



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Posgrado en Ciencias del Agua

**LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS COMO ESTRATEGIA  
PARA LA VALORACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA DE  
LA RESERVA GEOHIDROLÓGICA DEL ANILLO DE  
CENOTES, YUCATÁN**

Tesis que presenta

MYRNA LILI LÓPEZ MONZALVO

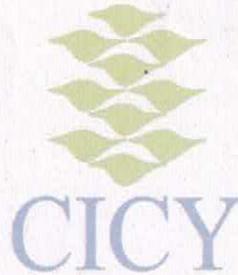
En opción al título de

MAESTRO EN CIENCIAS DEL AGUA

Cancún, Quintana Roo, México

Mayo de 2017

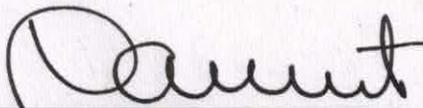
*CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA DE YUCATÁN, A. C.*  
*POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS*



**RECONOCIMIENTO**

Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis de **Myrna Lili López Monzalvo** titulado **“LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS COMO ESTRATEGIA PARA LA VALORACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA DE LA RESERVA GEOHIDROLÓGICA DEL ANILLO DE CENOTES YUCATÁN”** fue realizado en la Unidad de Ciencias del Agua, en la línea de Calidad y Uso Sostenible del Agua, en el laboratorio de Hidrogeoquímica y Calidad de Agua, del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., bajo la dirección de la Dra. Laura Margarita Hernández Terrones, perteneciente al Programa de Posgrado en Ciencias del Agua de este Centro.

Atentamente.



---

Dr. Manuel Martínez Estévez  
Director de Docencia

Mérida, Yucatán, México, a 22 de mayo de 2017

Cancún, Quintana Roo, México; a 6 de abril de 2017

## **DECLARACIÓN DE PROPIEDAD**

Declaro que la información contenida en la sección de Materiales y Métodos Experimentales, los Resultados y Discusión de este documento proviene de las actividades de experimentación realizadas durante el período que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis, en las Unidades y Laboratorios del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y que a razón de lo anterior y en contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, le pertenece patrimonialmente a dicho Centro de Investigación. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que deriven o pudieran derivar de lo correspondiente a dicha información, le pertenecen patrimonialmente al Centro de Investigación Científica, A.C., y en el mismo tenor, reconozco que si derivaren de este trabajo productos intelectuales o desarrollos tecnológicos, en lo especial, estos se registrarán en todo caso por lo dispuesto por la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la presente Declaración.



---

Myrna Lili López Monzalvo

## **Agradecimientos**

A mi asesora, Dra. Laura M. Hernández Terrones por confiar en mi trabajo e involucrarme en los temas y con las personas adecuadas para complementar mi proyecto. Por su dedicación y conocimiento, por sus consejos y sus palabras de aliento. Gracias por contribuir a mi crecimiento personal y profesional.

A todos mis profesores por compartir su conocimiento dentro y fuera del aula, por su disposición en resolver las dudas y el tiempo extra dedicado para escuchar mis inquietudes, desacuerdos o puntos de vista. Agradezco en particular al Dr. Gilberto Acosta por su tiempo y disposición.

Agradezco al equipo de trabajo por su apoyo profesional y personal durante todo el proceso, en particular a los técnicos Daniela Ortega, Sergio Escobar<sup>†</sup>, y Augusto Cervantes, a los estudiantes Tonatiuh, Pilar, Luisa y Nidia gracias por su apoyo en las salidas de campo, en el laboratorio, la cafetería y todos aquellos lugares donde se tomaron el tiempo de compartir su conocimiento, alegrías o preocupaciones, sin sus contribuciones este trabajo no hubiera sido posible.

A todas las personas que nos apoyaron para la aplicación de las encuestas de manera individual o a través de sus instituciones. Entre ellos están los doctores Alejandro Cano y Yameli Aguilar del INIFAP, el Dr. Javier Estrada de la Universidad Modelo, los doctores Oscar Moreno y Manuel Martínez del CICY Mérida, Neyra Silva del COTASMEY y otras instituciones como la UADY y Biólogos de la Península de Yucatán; también agradezco la labor de difusión realizada por familiares y amigos que viven en Mérida.

A la SEDUMA y todo su equipo de trabajo por compartir la información relevante para mi trabajo, recibirnos con las puertas abiertas y atender mis llamadas y correos en todo momento y facilitarnos el espacio para trabajar.

A los integrantes de mi comité evaluador de mis tutoriales y a los que participaron en mi examen de grado, gracias por sus recomendaciones, consejos y preguntas que me ayudaron a esforzarme y apropiarme de mi propio criterio.

A mis compañeros de clase, de pasillo y de sala de estudiantes por brindarme su compañía, su energía, su apoyo y asesoría en los temas que eran ajenos a mí, gracias por no dudar en proporcionar ayuda ante cualquier necesidad.

Al personal del CICY por proporcionarme todas las facilidades para utilizar las instalaciones, además de la asesoría y paciencia ante mis demandas.

Al CONACYT por brindarme la beca de posgrado y la beca mixta, recurso necesario para cubrir los gastos derivados del posgrado y permitir que pudiera concluir con mis estudios.

Al Dr. Daniel Revollo por compartir sus conocimientos y su tiempo sin esperar nada a cambio.

Y toda mi familia y amigos que me dieron ánimos y mostraron su empatía y aprobación para iniciar con este proceso y por supuesto a mi compañero de vida Uriel, por el apoyo incondicional ante la elección de este nuevo reto.

## INDICE

Resumen .....	11
<b>CAPÍTULO I. Introducción .....</b>	<b>13</b>
<b>Antecedentes .....</b>	<b>13</b>
<b>Servicios ecosistémicos y su clasificación .....</b>	<b>13</b>
<b>Valoración de los servicios ecosistémicos .....</b>	<b>21</b>
<b>Valoración económica de los servicios ecosistémicos enfocados a ecosistemas acuáticos .....</b>	<b>22</b>
1) <i>Métodos de preferencia revelada o de valoración indirecta .....</i>	<i>22</i>
2) <i>Métodos de preferencia establecida o de valoración directa .....</i>	<i>23</i>
<b>Planteamiento del problema.....</b>	<b>26</b>
<b>Justificación.....</b>	<b>27</b>
<b>Preguntas de investigación.....</b>	<b>28</b>
<b>Hipótesis .....</b>	<b>28</b>
<b>Objetivo General.....</b>	<b>29</b>
<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>29</b>
<b>Estrategia experimental.....</b>	<b>29</b>
<b>CAPÍTULO II. Identificación de los Servicios Ecosistémicos que brinda el acuífero</b>	<b>31</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>31</b>
<b>Reserva Hidrogeológica del Anillo de Cenotes .....</b>	<b>32</b>
<b>Actividades económicas en la ZRGHAC .....</b>	<b>35</b>
<b>Metodología .....</b>	<b>39</b>
<b>Trabajo de campo.....</b>	<b>39</b>
<b>Diseño de muestra .....</b>	<b>40</b>
<b>Diseño de encuesta y aplicación .....</b>	<b>40</b>
<b>Resultados .....</b>	<b>43</b>
<b>Servicios ecosistémicos que proporciona el acuífero .....</b>	<b>43</b>
<i>Servicios culturales.....</i>	<i>44</i>
<i>Servicios de provisión.....</i>	<i>52</i>
<i>Servicios de regulación.....</i>	<i>55</i>
<i>Servicios de sustento.....</i>	<i>58</i>
<b>Análisis del tamaño de muestra y de la información obtenida en la encuesta .....</b>	<b>62</b>
<i>Apartado 1: Características generales de los encuestados .....</i>	<i>62</i>
<i>Apartado 2: Conocimiento general del acuífero (gustos y preferencias) y zona de estudio .....</i>	<i>64</i>
<i>Funcionarios públicos de la ZRGHAC encuestados.....</i>	<i>64</i>
<b>Variables socioeconómicas y servicios ecosistémicos .....</b>	<b>66</b>
<b>Discusión .....</b>	<b>69</b>
<b>CAPÍTULO III. Evaluación de la calidad del agua y su relación con los servicios ecosistémicos.....</b>	<b>72</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>72</b>

<b>Metodología .....</b>	<b>74</b>
<b>Campañas de muestreo y selección de sitios .....</b>	<b>74</b>
<b>Análisis <i>in situ</i> .....</b>	<b>76</b>
<b>Análisis en laboratorio .....</b>	<b>77</b>
<b>Semáforo de calidad del agua de acuerdo al uso .....</b>	<b>77</b>
<b>Análisis estadístico .....</b>	<b>79</b>
<b>Semáforo de calidad de agua en relación a los servicios ecosistémicos que brinda.....</b>	<b>80</b>
<b>Resultados .....</b>	<b>80</b>
<b>Semáforo de calidad de agua de acuerdo al cumplimiento de normatividad .....</b>	<b>80</b>
<b>Semáforo para el análisis de los servicios ecosistémicos y su relación con la calidad del agua.....</b>	<b>86</b>
<b>Discusión .....</b>	<b>90</b>
<b>CAPÍTULO IV. Valoración económica del agua en los cenotes de la ZRGHAC .....</b>	<b>95</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>95</b>
<b>Metodología .....</b>	<b>97</b>
<b>Método de Valoración Contingente .....</b>	<b>97</b>
<b>Resultados .....</b>	<b>100</b>
<b>Aplicación del Modelo Logit.....</b>	<b>101</b>
<b>Análisis Estadístico.....</b>	<b>106</b>
<b>Discusión .....</b>	<b>110</b>
<b>CAPÍTULO V. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES GENERALES .....</b>	<b>112</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>118</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>129</b>

## Índice de Figuras

FIGURA 1. CLASIFICACIÓN DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS. ADAPTADO DEL MEA, (2005) .....	15
FIGURA 2. RELACIÓN ENTRE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS Y EL BIENESTAR HUMANO (MEA, 2005) .....	16
FIGURA 3. AGUA AZUL Y AGUA VERDE UTILIZADA PARA SOPORTAR LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS (TOMADO DE ROCKSTRÖM ET AL., 1999).....	18
FIGURA 4. FORMACIÓN DE CENOTES. FUENTE: GOBIERNO DEL EDO. DE YUCATÁN. (2012-2018). .....	20
FIGURA 5. TIPOS DE CENOTES. FUENTE: GOBIERNO DEL EDO. DE YUCATÁN. (2012-2018).....	20
FIGURA 6. LOCALIZACIÓN DE ZONA DE RESERVA GEOHIDROLÓGICA PROPUESTA POR HERNÁNDEZ-TERRONES ET AL. (2011) .....	33
FIGURA 7. MAPA DEL GRADO DE MARGINACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE LA ZONA DE RESERVA GEOHIDROLÓGICA ANILLO DE CENOTES (COTASMEY, 2015).....	34
FIGURA 8. ESTADO DE POBREZA DE LA POBLACIÓN DE LA ZONA DE RESERVA GEOHIDROLÓGICA ANILLO DE CENOTES (COTASMEY, 2015).....	34
FIGURA 9. ZONA DE RESERVA GEOHIDROLÓGICA ANILLO DE CENOTES DECRETADA (COTASMEY, 2015). .....	36
FIGURA 10. GRÁFICA SOBRE LOS USOS DEL AGUA EN EL ANILLO DE CENOTES (HM <sup>3</sup> /AÑO) (DOF, 2013)....	37
FIGURA 11. GRÁFICA SOBRE LOS USOS DEL AGUA EN LA ZONA DE RESERVA GEOHIDROLÓGICA ANILLO DE CENOTES. (HM <sup>3</sup> /AÑO) (DOF, 2013). .....	38
FIGURA 12. PORTADA DE LA ENCUESTA DISEÑADA EN GOOGLE DOCS.....	41
FIGURA 13. PERFIL DE LA COLUMNA DE AGUA EN EL A) CENOTE CHELENTÚN, B) NOH MOZÓN .....	57
FIGURA 14. PERFIL DE LA COLUMNA DE AGUA EN EL A) CENOTE KALCUCY Y B) TEABO (XPACAY) .....	57
FIGURA 15. MAPA DE VEGETACIÓN DEL ESTADO DE YUCATÁN (SEDUMA, 2015). .....	60
FIGURA 16. DISTRIBUCIÓN DEL GÉNERO DE LOS ENCUESTADOS. ....	62
FIGURA 17. ESCOLARIDAD DE LOS ENCUESTADOS. ....	63
FIGURA 18. INGRESO FAMILIAR APROXIMADO DE LOS ENCUESTADOS. ....	63
FIGURA 19. ACCIONES CON MAYOR IMPACTO EN LA PRESERVACIÓN Y CUIDADO DEL ACUÍFERO SEGÚN LOS ENCUESTADOS.....	64
FIGURA 20. BIENES O SERVICIOS QUE PROPORCIONA LOS CENOTES, CUEVAS O CAVERNAS IDENTIFICADOS POR LOS ENCUESTADOS. ....	65
FIGURA 21. SERVICIOS ECOSISTÉMICOS MÁS IMPORTANTES DEL ACUÍFERO DE LA ZRGHAC, IDENTIFICADOS POR LOS ENCUESTADOS .....	66
FIGURA 22. CENOTES MONITOREADOS O CENSADOS EN LA ZRGHAC (SEDUMA, 2015).....	73
FIGURA 23. UBICACIÓN DE LOS 11 CENOTES MUESTREADOS. ....	74
FIGURA 24. SEMÁFORO CON RANGOS DE CUMPLIMIENTO CON RESPECTO A LA CALIDAD DEL AGUA.....	79
FIGURA 25. ANÁLISIS DE SIMILITUD ENTRE LA CALIDAD DEL AGUA, LOS USOS Y LAS CAMPAÑAS DE MUESTREO (2015 Y 2016).....	84
FIGURA 26. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL ANÁLISIS DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS Y SU RELACIÓN CON LA CALIDAD DEL AGUA EN LOS SITIOS ESTUDIADOS EN MAYO DE 2015.....	88
FIGURA 27. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL ANÁLISIS DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS Y SU RELACIÓN CON LA CALIDAD DEL AGUA EN LOS SITIOS ESTUDIADOS EN MAYO DE 2016.....	89
FIGURA 28. GRÁFICA SOBRE LA RELACIÓN DE LA EDAD Y DAP DE LOS HABITANTES DE YUCATÁN. ....	101

## Índice de Tablas

TABLA 1. COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS DE VALORACIÓN ECONÓMICA PARA SERVICIOS ECOSISTÉMICOS RELACIONADOS CON EL AGUA (FUENTE: CGER, 1997; BIROL <i>ET AL.</i> , 2006).....	24
TABLA 2. COMPARATIVO DE POBLACIÓN TOTAL Y ANALFABETISMO DE ALGUNOS MUNICIPIOS DE LA ZRGHAC Y MÉRIDA.....	39
TABLA 3. ATRACTIVOS E INFRAESTRUCTURA TURÍSTICA POR MUNICIPIO DE LA ZONA DE RESERVA GEOHIDROLÓGICA ANILLO DE CENOTES (EN AZUL LOS RELACIONADOS CON EL AGUA).....	47
TABLA 4. ACTIVIDAD MANUFACTURERA Y OTRAS INDUSTRIAS POR MUNICIPIO DENTRO DE LA ZONA DE RESERVA GEOHIDROLÓGICA ANILLO DE CENOTES (SEDUMA, 2015) .....	53
TABLA 5. INSTALACIONES ASOCIADAS A LA ACTIVIDAD GANADERA POR MUNICIPIO DENTRO DE LA ZONA DE RESERVA GEOHIDROLÓGICA ANILLO DE CENOTES (SEDUMA, 2015).....	55
TABLA 7. RELACIÓN ENTRE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS BRINDADOS POR EL ACUÍFERO DE LA ZONA DE RESERVA GEOHIDROLÓGICA ANILLO DE CENOTES Y LAS VARIABLES SOCIO-ECONÓMICAS MEDIANTE CHI CUADRADA ( $\alpha=0.05$ ) (NS= NO EXISTE SIGNIFICANCIA).....	68
TABLA 8. CARACTERÍSTICAS DE LOS 11 CENOTES SELECCIONADOS EN LA ZONA DE ESTUDIO	76
TABLA 9. FICHA ELABORADA POR CENOTE (INCLUYE RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS ANALIZADOS PARA EVALUAR LA CALIDAD DE AGUA DE ACUERDO CON LA NORMATIVIDAD Y NIVEL DE CUMPLIMIENTO (EJEMPLO: CENOTE TANIMAX). (AUS= AUSENCIA) .....	78
TABLA 10. RESULTADOS DEL SEMÁFORO DE CALIDAD DE AGUA EN LOS ONCE CENOTES MUESTREADOS DE LA ZRGHAC.....	82
TABLA 11. ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) DE DOS VÍAS. SE CONTRASTA LOS RESULTADOS DE CALIDAD DE AGUA OBTENIDOS EN LOS ONCE CENOTES MUESTREADOS 2015 Y 2016, DE ACUERDO CON EL USO (NA: NO APLICA). .....	85
TABLA 12. NIVEL DE CUMPLIMIENTO DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS QUE BRINDA EL ACUÍFERO EN RELACIÓN A LA CALIDAD DE AGUA DE LOS ONCE CENOTES MUESTREADOS DE LA ZRGHAC (1: MUESTREO 2015, 2: MUESTREO 2016).....	87
TABLA 13. DISPOSICIÓN A PAGAR SEGÚN EL GÉNERO DEL ENCUESTADO Y MONTO MÁXIMO.	101
TABLA 14. MODELO DE VARIABLE DEPENDIENTE LIMITADA LOGIT BINARIO. N=224 (NOTA: A LAS 262 ENCUESTAS SE RESTARON 38 AUSENTES O INCOMPLETAS).....	102
TABLA 15. ESCOLARIDAD Y DAP POR MANTENER LIMPIOS LOS CENOTES DE LA ZRGHAC..	104
TABLA 16. RELACIÓN DEL INGRESO FAMILIAR Y LA DAP.....	105
TABLA 17. RELACIÓN ENTRE EL NÚMERO DE INTEGRANTES DE FAMILIA Y LA DAP.....	105
TABLA 18. RESULTADOS ANÁLISIS ESTADÍSTICO ENTRE LAS VARIABLES Y LA DAP (CHI CUADRADA, $\alpha=0.05$ ) .....	107
TABLA 19. ESTIMACIÓN DE MONTOS MENSUALES EN RELACIÓN AL PORCENTAJE DE DAP (FUENTE: INEGI, 2012).....	109
TABLA 20. ESCENARIOS CON DISTINTOS MONTOS DE DAP EN RELACIÓN DEL PORCENTAJE DE HOGARES CON SERVICIO DE AGUA ENTUBADA.....	109

## **Listado de Abreviaturas**

**CONAGUA** Comisión Nacional del Agua

**COTASMEY** Consejo Técnico de Aguas Subterráneas de la zona metropolitana de Mérida

**DAP** Disposición a pagar

**DOF** Diario Oficial de la Federación

**INEGI** Instituto Nacional de Estadística y Geografía

**IPBES** Plataforma Intergubernamental Científico Normativa sobre Biodiversidad y Servicios de los Ecosistemas (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services)

**JAPAY** Junta de Agua Potable y Alcantarillado de Yucatán

**MEA** Millenium Ecosystem Assesment

**MVC** Método de Valoración Contingente

**NOAA** National Oceanic and Atmospheric Administration

**OD** Oxígeno disuelto

**ONU** Organización de Naciones Unidas.

**OMS** Organización Mundial de Salud

**pH** Potencial de hidrógeno

**RHA** Región Hidrológico-Administrativa

**PNUD** Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo

**SE** Servicios Ecosistémicos

**SEDUMA** Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente

**SDT** Sólidos disueltos totales.

**WHO** World Health Organization

**ZRGHAC** Zona de Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes

## Resumen

Establecer una línea base para la valoración de los servicios ecosistémicos del acuífero de la Zona de Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes, a partir del estudio de algunos cenotes; para contribuir a la gestión integral del agua subterránea en la Península de Yucatán. Para esto se desarrollo una estrategia metodológica, se diseño y aplicó una encuesta dirigida a habitantes de la ciudad de Mérida como principales usuarios del agua subterránea para conocer su percepción sobre los SE del acuífero y su disposición a pagar (DAP) por mantener limpios los cenotes los próximos 10 años. Se identificados 13 Servicios Ecosistémicos que brinda el acuífero de la Zona de Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes (ZRGHAC), clasificados en culturales (turismo y recreación, educación ambiental, investigación y la cosmovisión maya de cenotes, grutas y cavernas), de sustento (conduce y/o transporta agua subterránea, captación de agua de lluvia, depuración de masas de agua, barrera contra la intrusión salina), de regulación (mantenimiento de cobertura vegetal, preservación de la biodiversidad) y provisión (agua para consumo humano, riego agrícola y uso pecuario). Se evaluó la calidad de agua de la ZRGHAC en once cenotes de acuerdo a la normativa nacional e internacional, considerando diversos usos de los mismos. Se desarrollaron dos semáforos para realizar un comparativo de la calidad del agua en relación al cumplimiento con la normatividad (NOM-127-SSA1-1994, WHO, CE-CCA-001/89), y un segundo semáforo para establecer la relación de los SE con la calidad del agua. Los resultados muestran un ecosistema dinámico, sin intrusión salina, de manera global una calidad de agua de buena a muy buena. La valoración económica se realizó a través del Método de Valoración Contingente, se determinó que el 76% de los usuarios encuestados (habitantes de las zonas urbanas circundantes) tienen una disposición a pagar en promedio de \$90 pesos para mantener la calidad del agua de los cenotes en los próximos diez años. Esta cuota podría llegar a recaudar \$136,748,604 pesos anuales. Las proyecciones económicas realizadas ponen en evidencia un panorama que podría asegurar una fuente de ingreso para apoyar las acciones establecidas en el Programa de Manejo de la ZRGHAC u otros programas que fomenten el usos sostenible del agua subterránea. El monitoreo permanente de la calidad del agua y su interpretación nos permite evaluar el status de los SE del acuífero. Es necesario valorar el acuífero desde el punto de vista económico, ecológico y sociocultural. Para una gobernanza efectiva del agua es necesario un equilibrio de intereses entre todas las partes, dentro de un marco legal e institucional.

## **Abstract**

This study focused on assessing a baseline for the aquifer services ecosystem evaluation, starting with the study of some sinkholes, to contribute to the integrated management of groundwater in the Yucatan Peninsula. This study was done within the Geohydrological Reserve Zone of the Ring of Cenotes (GRZRC), Yucatan, Mexico. The assessment was accomplished by applying a survey to Merida city habitants, evaluating their perception of Ecosystem Services (ES) provided by the aquifer as well as their disposition to pay a maintenance fee (DAP) to keep sinkholes clean for the next 10 years.

There were 13 ES provided by the aquifer within the GRZRC identified in this study. This ES were classified as cultural (tourism and recreation, environmental education, research, and Mayan sinkholes cosmovision) support (conduct and/or transport of groundwater, water purification, and saltwater intrusion barrier), regulation (plant cover conservation and preservation of biodiversity), and provision (water for human consumption, water for agricultural irrigation, and water for livestock demands). Water quality of the GRZRC was evaluated in eleven sinkholes based on national and international norms as well as considering different sinkhole uses. Two color codes were developed to compare the sinkholes water quality (first color code) regarding the legislation. Results show a dynamic system, without saltwater intrusion, and good to excellent water quality. Also, the relationship between ES and water quality is established by legislation parameters (NOM-127-SSA1-1994 and CE-CCA-001/89) in a second color code. The economic value was estimated using the Contingent Valuation Method. 76% of the surveyed people (sinkhole users and inhabitants of Merida mainly) are willing to pay an average of \$90 Mexican pesos (per month per person) to maintain groundwater quality for the next ten years. This amount represents \$136,748,604.00 Mexican pesos per year. Projections of this scenario show a complementary income, which could be useful to ensure the sustainable use of Yucatan's groundwater, supporting the GRZRC Management Program objectives. A long-lasting monitoring program for water quality is necessary to accurately evaluate the status of ES provided by the aquifer. Moreover, it is necessary to assess the aquifer as an ecosystem with an economic, ecologic and socio-cultural importance. In conclusion, effective water governance requires a balance of interests between all parties, within a legal and institutional framework.

## **CAPÍTULO I. Introducción**

El desarrollo de socio-económico de nuestra sociedad se logra gracias a los beneficios que recibimos de los ecosistemas (Balvanera *et al.*, 2016). Los seres humanos dependemos de los servicios ecosistémicos para sobrevivir y mejorar nuestra calidad de vida (Brauman *et al.*, 2007). Sin embargo, este aprovechamiento de los ecosistemas también los ha deteriorado y modificado poniéndolos en una situación crítica o de pérdida, la cual sigue aumentando a medida que la demanda de los servicios ecosistémicos incrementa (MEA, 2005; Bennett *et al.*, 2009).

Una visión ecosistémica se centra en los servicios que reciben las poblaciones humanas por parte de los ecosistemas y refleja la estrecha dependencia e interacción que tenemos como seres humanos con los ecosistemas (Maass, 2016). Por lo tanto, se vuelve fundamental conocer, entender, debatir, investigar y descubrir los vínculos que existen entre los ecosistemas y el bienestar humano.

### **Antecedentes**

#### **Servicios ecosistémicos y su clasificación**

De acuerdo con Odum *et al.* (1971), la pregunta ¿Cuánto vale la naturaleza? es relevante y no tiene una respuesta simple y definitiva. El conocimiento de bien y servicio ecosistémico nos permite entender mejor la manera en que los activos naturales afectan la calidad de la vida en la Tierra (Daily *et al.*, 2000, Carpenter y Folke 2006). En los últimos años se han multiplicado los esfuerzos dirigidos a estimar el valor de los bienes y servicios de la naturaleza, los cuales se encaminan a ofrecer una medida de la capacidad de los ecosistemas para satisfacer necesidades esenciales a la vida.

El concepto de servicios ecosistémicos surge en los años ochenta para describir un marco de referencia que estructura y sintetiza el entendimiento biofísico de los procesos de los ecosistemas y el vínculo con el bienestar humano permitiendo una relación explícita entre el estado y el funcionamiento de los ecosistemas (Mooney y Ehrlich, 1997). Esta relación puede ser directa o indirecta y los seres humanos pueden o no estar conscientes de su

existencia; y esta consciencia puede detonar un interés para protegerlos y estudiarlos (Balvanera y Cotler, 2007).

De acuerdo con Balvanera *et al.* (2016), los servicios ecosistémicos son una alternativa que facilita medir el valor de los ecosistemas y promueve la integración de estos valores a estrategias nacionales y ha sido aplicada con éxito en algunos países como Australia, Canadá, en algunos países de la Unión Europea, y México. Dichos países los utilizan como una herramienta efectiva para la toma de decisiones, relacionadas con el manejo y uso sustentable de los recursos del planeta, así como la identificación del capital natural en una escala local, regional, nacional o global.

La definición de servicios ecosistémicos se refiere a los beneficios que obtenemos las poblaciones humanas de los ecosistemas Entendiendo que el ecosistema es la unidad funcional básica de la naturaleza, donde interactúan componentes bióticos como plantas, animales y microorganismos, entre ellos los seres humanos; y abióticos como la energía, agua, suelos, nutrientes y la atmósfera. Sin embargo, alrededor del 60% de los servicios ecosistémicos están degradados o son usados de manera insostenible (MEA, 2005; Bergkamp y Cross, 2006; Brauman *et al.*, 2007; Balvanera *et al.*, 2016).

Adicionalmente, el MEA (2005) propone una tipología que permite analizar los vínculos entre el bienestar de las poblaciones humanas y los ecosistemas agrupándoles en cuatro grupos: provisión, regulación, culturales y de sustento (Figura 1), la cual ha sido utilizada por Instituciones y expertos en el tema para identificar y tipificar los servicios ecosistémicos a escalas locales y regionales. Los servicios ecosistémicos que se identifican más fácilmente son los de **provisión**, se trata de bienes tangibles también llamados recursos naturales o bienes. En esta categoría están incluidos los alimentos, el agua, la madera, o las fibras. Estos servicios proporcionan el sustento básico de la vida humana; los esfuerzos por asegurar su provisión guían las actividades productivas y económicas. Los de **regulación** incluyen procesos ecosistémicos complejos mediante los cuales se regulan las condiciones del ambiente en que los seres humanos realizan sus actividades productivas. En esta categoría se incluyen la regulación climática, la regulación de los vectores de enfermedades y la regulación de la erosión de los suelos, por mencionar algunos (Bergkamp y Cross, 2006; Barbier *et al.*, 2011).

Los ecosistemas brindan también beneficios que dependen de las percepciones colectivas de los seres humanos acerca de los ecosistemas y de sus componentes. En este caso se habla de servicios **culturales**, los cuales pueden ser materiales o no materiales, tangibles o intangibles. Los beneficios espirituales, recreativos, educativos o de investigación que brindan los ecosistemas se consideran en esta categoría. Estos servicios representan los valores que los individuos o los grupos sociales otorgan a los ecosistemas y sus componentes (Chan *et al.*, 2012). Por último, se encuentran los servicios de **sustento** que son los procesos ecológicos básicos que aseguran el funcionamiento adecuado de los ecosistemas y el flujo de servicios de provisión, de regulación y culturales (Bergkamp y Cross, 2006).



Figura 1. Clasificación de servicios ecosistémicos. Adaptado del MEA, (2005)

En la Figura 2 se muestran los vínculos existentes entre el bienestar humano y los servicios ecosistémicos que se encuentran directamente relacionados con el consumo y el uso o acceso a los servicios que impactan en la calidad de vida de los seres humanos.

Debido a que no asignamos un valor cuantitativo equivalente al servicio provisto por el ecosistema, no somos conscientes ni cuantificamos el valor económico, ecológico o sociocultural que este servicio proporciona, esta información es de gran utilidad para el estudio de los servicios ecosistémicos.



**Figura 2. Relación entre los servicios ecosistémicos y el bienestar humano (MEA, 2005)**

### **Servicios de los ecosistemas acuáticos**

Las aguas subterráneas, los lagos y los ríos están estrechamente conectados con los sistemas terrestres (Magnuson *et al.*, 2006). El clima, el suelo y las características de uso del agua de las plantas terrestres afectan la infiltración de agua a las aguas subterráneas y el escurrimiento a las aguas superficiales. Los sistemas terrestres contribuyen con nutrientes y materia orgánica a los sistemas de agua dulce. Los organismos terrestres son comidos por los acuáticos, y viceversa. Una unidad natural en la que se observa la conexión entre los ecosistemas terrestres y acuáticos es la cuenca. Dentro de una cuenca, los ecosistemas están estrechamente vinculados por los flujos de agua, los nutrientes y la materia orgánica, y los movimientos de los organismos. Así, las cuencas hidrográficas son unidades naturales de análisis de los recursos acuáticos, las personas se encuentran estrechamente ligadas al agua de la cuenca donde habitan (Carpenter y Biggs 2009).

De acuerdo con Falkenmark y Rockström (2004), el agua dulce apoya las sociedades humanas y los ecosistemas en dos formas principales: "agua azul" y "agua verde". El agua azul es lo que normalmente pensamos cuando consideramos los recursos hídricos: agua líquida en ríos, lagos, reservas y acuíferos subterráneos. El agua azul es importante para una serie de servicios esenciales, incluyendo el agua potable y el saneamiento, la producción de alimentos a través del riego, el transporte y la producción de energía. El agua azul también soporta una diversidad de ecosistemas acuáticos. El agua verde es la humedad del suelo que soporta toda la vegetación no irrigada, incluyendo cultivos de secano, pastos, madera y vegetación natural terrestre. El agua verde fluye por evaporación y la transpiración supera los flujos de agua azul en ríos y acuíferos (Figura 3).

Además de agua y alimento, los ecosistemas de agua dulce proporcionan una serie de otros servicios que sostienen a las sociedades modernas. Los más importantes son los procesos ecológicos que mantienen el medio ambiente y los recursos de los que depende la gente. Los ecosistemas acuáticos como lagos y humedales juegan un papel importante en la regulación del flujo de agua. Ayudan a atenuar las inundaciones, a recargar el agua subterránea ya mantener el flujo del río durante los periodos secos liberando el agua almacenada durante los periodos húmedos. Esta regulación hidrológica reduce la necesidad de contar con un costoso sistema de control de inundaciones y una

infraestructura de almacenamiento de agua. La vegetación de muchas aguas interiores atrapa sedimentos, nutrientes y contaminantes como metales pesados. Esto ayuda a mantener un agua de calidad adecuada para beber y regar sin necesidad de un tratamiento de agua caro. La captura de sedimentos y la descomposición de los contaminantes también reducen la degradación de hábitats aguas abajo que son importantes para la producción de peces (Carpenter y Biggs 2009). El valor de los servicios de regulación proporcionados por el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos a menudo no se reconoce hasta que se degradan o destruyen.

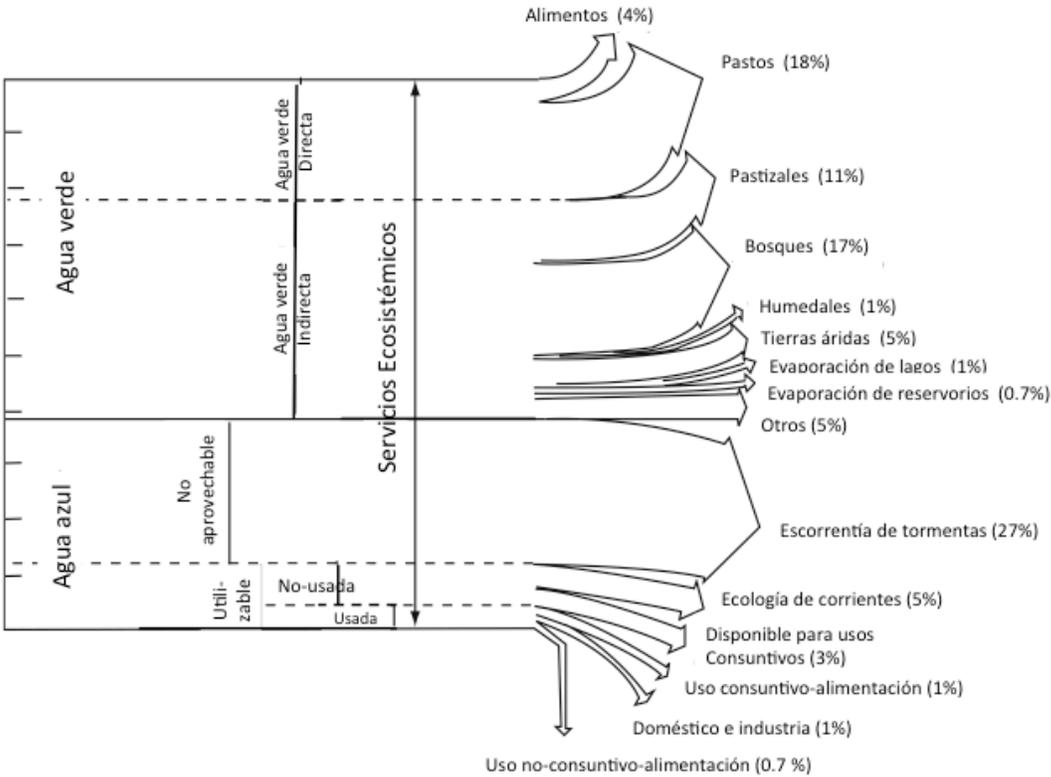


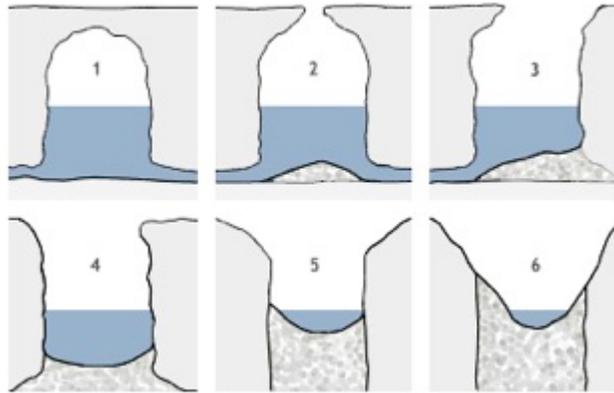
Figura 3. Agua azul y agua verde utilizada para soportar los servicios ecosistémicos (tomado de Rockström et al., 1999).

## **Los cenotes como unidad de aproximación al estudio del acuífero en el marco de la RGHAC**

En la Península de Yucatán, el acuífero se manifiesta visualmente a los seres humanos a través de cenotes que son considerados ecosistemas acuáticos-epicontinentales con limitado conocimiento sobre su propio funcionamiento (Rodríguez-Estrella *et al.*, 2016). La palabra cenote proviene del vocablo maya “dzonot”, y es utilizada para todas aquellas formaciones geológicas que por diversos procesos como la infiltración del agua de lluvia a través de las hendiduras del suelo, provoca que la roca caliza se vaya disolviendo poco a poco, provocando el colapso del techo de la caverna (Beddows *et al.*, 2007; Bauer-Gottwein *et al.*, 2011) (Figura 3). Algunos autores (Beddows *et al.*, 2007; Medina, 2008) clasifican a los cenotes en tres grupos principales: 1) los semi-abiertos donde el techo está parcialmente colapsado, 2) los abiertos, en los que el techo se ha caído por completo y dibujan una superficie circular, 3) los secos, que se les denomina así porque aparentemente no contiene agua, sin embargo es posible que si la haya, solo que debido al material colapsado no se logre percibir a simple vista su presencia (Medina, 2008).

De acuerdo con el Gobierno del estado de Yucatán (SEDUMA, 2012), los cenotes pueden dividirse en cuatro tipos (Figura 4): los semi-abiertos, o en forma de cántaro, con una pequeña abertura superior y diámetro creciente hacia la superficie del agua y aún más abajo; los abiertos, de caída libre, con paredes sensiblemente verticales; los llamados "antiguos cenotes", o aguadas, cuyas paredes se separan por encima del agua; muchos de este tipo están secos o conservan un poco de líquido de la estación pluviosa; y los de forma de caverna con entrada por un lado.

Las dolinas son formaciones características de un sistema kárstico (Ford y Williams, 2007). Suelen tener formas circulares y diámetros variados y se forman gracias a procesos de disolución, colapso o hundimiento. Las dolinas o cenotes desde una visión ecosistémica son considerados ecosistemas acuáticos y su estudio tiene distintas vertientes como las poblaciones que conforman las comunidades, la biodiversidad que éstos presentan, las interacciones que se presentan ó los procesos fisicoquímicos que ocurren en un espacio y tiempo determinado (Balvanera *et al.*, 2016)



1. Caverna abovedada, cuyo techo no ha caído; 2. Período posterior, en el que la mitad de la bóveda se ha desplomado ya; 3. La mayor parte del techo ha caído, quedando aún una pequeña parte; 4. Cenote típico de paredes verticales; 5. Etapa posterior en la que las paredes están siendo desgastadas; 6. Un topográficamente antiguo cenote o aguada en forma de caldero con un manantial en el fondo.

**Figura 4. Formación de cenotes. Fuente: Gobierno del Edo. de Yucatán. (2012-2018).**



**Figura 5. Tipos de cenotes. Fuente: Gobierno del Edo. de Yucatán. (2012-2018).**

Estas formaciones derivadas de procesos biogeoquímicos han servido como medios de transportación y almacenaje de agua subterránea permitiendo a los habitantes disponer del recurso hídrico y realizar sus actividades cotidianas logrando el bienestar humano (Chan *et al.*, 2012). Según De Marsily (1992), estas actividades al mismo tiempo pueden provocar el deterioro de la calidad del agua en los acuíferos. Rockström *et al.* (2009) consideran relevante conocer los cambios que sufren los ecosistemas a consecuencia de las sociedades humanas. Algunos ejemplos son el uso intensivo de fertilizantes,

insecticidas y plaguicidas para la agricultura, introducción accidental de especies exóticas, tratamientos para la cosecha, descargas de agua contaminada, el uso de cenotes como abrevaderos de ganado doméstico, tiraderos a cielo abierto, deficiente manejo de desechos industriales o aguas residuales para uso doméstico (RAMSAR, 2010).

Los cenotes ofrecen una serie de beneficios al ser humano y también a otros ecosistemas, estos beneficios pueden disminuir si la calidad del agua disminuye (Brauman *et al.*, 2007). Los beneficios o servicios ecosistémicos que se logran identificar son desvalorizados porque no se relacionan con un valor económico, ecológico ni sociocultural (Brauman *et al.*, 2007). Uno de los servicios ecosistémicos culturales característico del acuífero en la Península de Yucatán es la visita a cenotes para fines turísticos y recreativos. Basados en la oferta y demanda se les asigna precios a los tours, accesos y traslados al sitio, así como otros servicios complementarios. Sin embargo, es necesario realizar una valoración integral de los beneficios, no sólo cuantitativos sino también cualitativos que en ocasiones pasan desapercibidos por ser intangibles y/o abstractos.

### **Valoración de los servicios ecosistémicos**

Barbier *et al.* (2011), muestran que la forma de categorizar económicamente a los servicios ecosistémicos es en tres categorías: bienes, servicios y beneficios culturales; lo cual refleja el vínculo entre el servicio ofrecido y el beneficio adquirido a través de una remuneración económica. Sin embargo, Mendelsohn y Olmstead (2009), asumen el concepto como un beneficio económico que provee el ambiente, y ese bien o servicio equivale a la suma de lo que la sociedad está dispuesta a pagar, lo cual dejaría a un lado aquellos servicios ecosistémicos que no cuentan con un valor económico utilizado en el mercado.

Los servicios ecosistémicos pueden caracterizarse más ampliamente en servicios intermedios y finales que en ocasiones pueden estar relacionados con un mismo bien o servicio final (Polasky y Segerson, 2009). Para estos autores la recreación podría ser considerada como un servicio ecosistémico cultural con servicios intermedios y finales, mientras que para Boyd y Banzahf (2007) no necesariamente todos los servicios obtenidos de la naturaleza pueden verse como un beneficio. En el caso de la recreación,

Barbier *et al.* (2011), plantean que las actividades lúdicas brindan servicios ecológicos (en la mayoría de los casos sin valor económico definido), así como bienes y servicios convencionales con un valor comercial unitario. En el caso de los servicios de provisión, su valor es asignado directa o indirectamente por los mercados existentes como lo son los alimentos, la madera y otras materias primas por lo que identificar su valor económico es más sencillo porque son extraídos directamente de la naturaleza (Balvarena *et al.*, 2016).

Para atribuir un valor económico a los servicios de regulación, sustento o culturales se utilizan enfoques de valoración en base a la disposición a pagar, costos de daños evitados, gastos de viaje, o los valores hedónicos (Birol *et al.*, 2006). Los valores socioculturales de los servicios ecosistémicos representan un valor agregado, resultado de una combinación de valoraciones individuales; algunos métodos de valoración utilizados para este tipo de valores son las encuestas de preferencias, comparaciones pareadas, narrativa o métodos participativos.

### **Valoración económica de los servicios ecosistémicos enfocados a ecosistemas acuáticos**

Existen diversos métodos económicos para realizar un cálculo del valor de los servicios ecosistémicos enfocados al agua (Birol *et al.*, 2006). En la Tabla 1 se describen algunos de los métodos utilizados para la valoración en la que se considera el agua. Los métodos se clasifican como sigue:

#### *1) Métodos de preferencia revelada o de valoración indirecta*

En estos métodos, los bienes ambientales se consideran de forma implícita en la mercancía adquirida por el consumidor. Su disposición a pagar es el eje para definir su valor o beneficio brindado en función de su valor de uso (directo o indirecto). Esta disposición a pagar está basada en la conducta observada en los mercados de sustitución. Los métodos más comunes para la valoración de recursos hídricos de forma indirecta son el Método de Precios Hedónicos y el Método del Costo de Viaje, aunque sólo estiman los valores de uso. Otros métodos son: Reemplazo del costo, Gastos Preventivos, Enfoque de la Función de Producción, Preferencia revelada, la Utilidad Neta del Factor, Costo de la Enfermedad y los Precios de Mercado (Birol *et al.*, 2006).

## *2) Métodos de preferencia establecida o de valoración directa*

Su principal aportación es incluir los valores de no uso, lo cual implica tomar en cuenta los recursos ambientales no considerados en el mercado. Este método se basa en encuestas y permite la estimación de cada componente de su valor económico total. Debido a que la mayoría de las funciones y procesos derivados de los recursos hídricos no cuentan con un valor comercial, estos métodos contribuyen a la valoración de los beneficios económicos que éstos brindan (Birol *et al.*, 2006).

**Tabla 1. Comparativo de los métodos de valoración económica para servicios ecosistémicos relacionados con el agua (Fuente: CGER, 1997; Birol et al., 2006)**

<b>Método</b>	<b>Descripción</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Autores</b>
Método de precios hedónicos (HPM)	Basado en la teoría del valor de las características donde todo bien posee ciertas características con cierto grado de jerarquía y el precio del bien depende de las mismas al igual del nivel en el que se encuentren.	Basado en datos disponibles y visibles del comportamiento y selección.	Dificultad para detectar pequeños efectos en la calidad de factores ambientales reflejados en los precios del sitio. La conexión entre los precios implícitos y las medidas de valor es compleja y en ocasiones imposible de obtener. Valoración posterior. No contempla los valores de no uso.	Lancaster (1966) Griliches (1971) Rosen y Milliman (1959) Hartamn y Anderson (1962) Hamilton Ready y Abdalla.
Método del costo del viaje (TCM)	Considera el tiempo y los costos del viaje asumido por el visitante, los cuales representan el precio de acceso al sitio.	Basado en datos visibles y disponibles de un comportamiento y selección actual. Relativamente barato.	Requiere un comportamiento fácilmente identificable. Limitaciones a viajar in situ y a la evaluación de la situación actual. Posibles problemas de selección de la muestra. Valoración posterior No contempla los valores de no uso.	Hotelling (1931) Clawson y Knetsch (1966) Caulkins <i>et al.</i> (1986) Smith y Desvousges, (1986) Bockstael <i>et al.</i> (1987) Bell y Leeworthy, (1990) Cooper y Loomis, (1991)
Método del remplazo del costo	Valora a través del costo del reemplazo de activos dañados. (incluye el activo ambiental). Supone que el daño es medible y el valor del activo del ambiente no es mayor que el costo de reemplazo. No contempla beneficios secundarios derivados de los gastos para la protección al ambiente. Aplicable para el cumplimiento de estándares como el nivel en la calidad del agua.	Basado en datos visibles y disponibles de un comportamiento y selección actual. Relativamente barato. Provee un menor rango de incertidumbre en la disposición a pagar en caso que existan suposiciones previas.	Necesidad de un comportamiento fácilmente visible. Sólo estima, no considera todos las pérdidas de la degradación ambiental. Varios supuestos clave deben cumplirse para obtener estimaciones fiables. Sólo evalúa la situación actual. Valoración posterior No mide los valores de no uso.	Markandya <i>et al.</i> (2002)
Método de gastos preventivos	Utilizado para valorar los bienes y servicios no valorados en el mercado que son considerados entradas de producción para los bienes mercantiles.	Basado en datos visibles para las empresas que utilizan el agua como una entrada. Firmemente basada en la teoría microeconómica. Relativamente barata.	Subestima la disposición a pagar. Valoración Posterior. No mide los valores de no uso.	Achayra y Barbier (2002)

Tabla 1. Continuación...

Método	Descripción	Ventajas	Desventajas	Autores
Utilidad neta del factor	Los ingresos netos de los factores estiman <u>cambios en los excedentes</u> restando los costos de otros insumos en la producción de los ingresos totales, y atribuye el excedente restante como el valor de la entrada del medio ambiente.	Basado en datos disponibles y visibles del comportamiento y selección. Relativamente barato.	Valoración posterior No mide los valores de no uso Los costos pueden variar de acuerdo a las características específicas del lugar. Potencial a las distorsiones del mercado y a los valores de sesgo. Limitado a la valoración de la situación actual. EJ: los beneficios económicos de la mejora de la calidad del agua puede ser medida por el aumento de los ingresos de una mayor productividad agrícola, cuando la calidad del agua se incrementa. La calidad del agua afecta los costos de la purificación del agua potable municipal, los beneficios económicos pueden ser medidos por la disminución de costo de suministro de agua potable.	Brander <i>et al.</i> (2006)
Método del costo de la enfermedad	Se calcula mediante la estimación de los posibles ahorros directos resultantes de la enfermedad	Poca inversión.	Omite la no utilidad asociada a la enfermedad. Subestima la disposición a pagar pasando por alto los costos de evitar. Limitado a la evaluación de la situación actual. Valoración Posterior.	CGER (1997)
Precios de mercado	Se utiliza para valorar los costos/beneficios asociados con los cambios en la calidad y cantidad de los bienes (ambientales) que se negocian en mercados funcionales. Generalmente se utilizan con otros métodos de valoración indirecta.	Basado en datos visibles de selecciones actuales en el mercado o intercambios.	No proporciona valores totales (incluidos los valores de no uso). Limitado a la evaluación de la situación actual. Potencial a las distorsiones del mercado y a valores de sesgo.	N/A
Método de valoración contingente (CVM)	Se utiliza para estimar los valores económicos para todo tipo de ecosistemas y servicios ambientales. Con esta técnica se pueden estimar los valores de uso y no uso de los servicios ambientales.	Calcular el valor de cualquier bien sin la necesidad del estudio del comportamiento. Mide los valores en no uso. La técnica es de fácil comprensión. Se adapta a la pre y post valoración.	Sujeto a diversos sesgos (entrevistas, punto de partida, la no respuesta, la respuesta de afirmación, de insensibilidad al alcance o de incorporación, creación de un mercado hipotético).	Cummings, Brookshire y Schulze (1986) Mitchel y Carson (1989,1993) Riera <i>et al.</i> (1995) Pate y Loomis (1997) Oglethorp y Miliadou (2000) Brouwer <i>et al.</i> (2003)

### **Planteamiento del problema**

En México existe una gran diversidad de ecosistemas terrestres y acuáticos (CONABIO, 2009); nuestro país es considerado megadiverso ubicándose en la lista de los 17 países con mayor biodiversidad en el mundo (Burneo, 2009). Asimismo, posee una riqueza biocultural reflejada en las 70 lenguas indígenas que cuentan con hablantes en todo el país (INEGI, 2015). Su capital natural ha permitido el desarrollo de los sectores económicos y sociales. Sin embargo, a pesar de esta riqueza, el capital natural del país se encuentra deteriorado y cada vez es más común escuchar sobre problemáticas ambientales como la contaminación del aire, suelo y agua, agravando problemas nacionales como la pobreza y la desigualdad económica y social (Sarukhán *et al.*, 2012).

México cuenta con 653 acuíferos y el 16% se encuentran sobreexplotados (CONAGUA, 2015). La Región Hidrológico Administrativa XII Península de Yucatán se conforma por los estados de Quintana Roo, Campeche y Yucatán, a su vez se subdivide en tres regiones hidrológicas: Yucatán Norte, Oeste y Este. Esta región barca 4.43 millones de habitantes, produce el 8% del PIB y cuenta con 127 municipios; su volumen de agua renovable<sup>1</sup> es de 29,856.3 hm<sup>3</sup>/año, volumen superior a la demanda generada para diferentes usos como la agricultura, la industria, el público-urbano y otros servicios múltiples (CONAGUA, 2015). De acuerdo a la delimitación de acuíferos de 2013, la RHA XII cuenta con cuatro acuíferos, Xpujil, Cerros y Valles, Isla de Cozumel y Península de Yucatán (CONAGUA, 2012) tiene una recarga media de 25,316 hm<sup>3</sup>/año, es decir, más del 32% de la recarga media de todo el país y su precipitación pluvial normal anual es de 1218 mm (DOF, 2013, CONAGUA, 2015).

El Estado de Yucatán tiene una población de 1,955,577 habitantes y la ciudad Mérida con 830,732 mil habitantes (INEGI, 2010), todos ellos usuarios dependientes del recurso hídrico. El incremento en la población y actividades económicas tiene como consecuencia, el incremento en la demanda de agua para consumo doméstico, agrícola e industrial (MEA, 2005; Brauman *et al.*, 2007). Es importante proponer estrategias de

---

<sup>1</sup> El agua renovable es la cantidad de agua máxima que es factible explotar anualmente. Se calcula con el escurrimiento superficial virgen anual, más la recarga media anual de los acuíferos, más las importaciones de agua de otras regiones o países, menos las exportaciones de agua a otras regiones o países (CONAGUA, 2015)

gestión integral que aseguren la presencia del agua para el uso humano para las generaciones futuras (Domínguez *et al.*, 2012).

### **Justificación**

El acuífero por sus características geológicas actúa como presa de almacenamiento y red de distribución, y permite la extracción del recurso hídrico en cualquier época del año (Bergkamp y Cross, 2006). El acuífero se define como una roca o capas de roca capaces de almacenar agua debido a su porosidad y a la vez cuenta con la permeabilidad necesaria que permite al agua subterránea fluir entre la roca o rocas (Price, 2011). También es considerado un ecosistema ya que existen factores bióticos y abióticos que permiten el flujo de materia y energía. Los factores bióticos del acuífero representan la flora y fauna existente como las bacterias, algas, protozoarios, micro y macro invertebrados, insectos, crustáceos, reptiles, aves, murciélagos e incluso mamíferos que cohabitan en los cenotes y la selva. Los factores abióticos del acuífero son la roca cárstica, los espeleotemas como las estalactitas y estalagmitas, el agua, el aire y el sedimento. Las características hidrogeológicas, las relaciones biológicas, físicas, químicas y bioquímicas; así como los procesos presentes permiten visualizar el acuífero como un ecosistema (Chapin III *et al.*, 2011).

En el caso del acuífero “Península de Yucatán”, éste cuenta con un área de reserva geohidrológica decretada en 2013 que abastecerá a Yucatán, en particular a la ciudad de Mérida en los próximos años, el cual se mantiene con condiciones de calidad de agua de buena a muy buena (DOF, 2013). Esta zona representa un parteaguas para el desarrollo sostenible de la zona ya que tiene un alto valor ecológico y sociocultural.

Esta información brindará información a los tomadores de decisiones del Estado de Yucatán; ya que un estudio sobre los servicios ecosistémicos del acuífero de la Península de Yucatán facilita la identificación y categorización de los beneficios que brinda el Anillo de Cenotes a la población, específicamente la Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes. A la fecha, no se tienen estudios sobre los servicios ecosistémicos que proporciona el acuífero. Los resultados de este trabajo pueden complementar el plan de manejo de la Zona de Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes con el fin de fomentar un uso sostenible.

## **Preguntas de investigación**

¿Cuáles son los principales servicios ecosistémicos que provee el acuífero en la Zona de Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes?

¿Cuál es la relación entre la calidad del agua de los cenotes y los servicios ecosistémicos que brinda el acuífero de la Zona de Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes?

¿Cuál es la DAP por conservar la integridad de Zona de Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes y por lo tanto los servicios ecosistémicos que brinda? ¿Qué variables socio-ambientales y económicas afectan o determinan la DAP?

## **Hipótesis**

Los ecosistemas están siendo explotados para obtener prioritariamente uno o varios servicios, ocasionando cambios en la biodiversidad y repercutiendo directa o indirectamente sobre el bienestar humano, aunque existe una idea intrínseca de servicios ecosistémicos ligada al uso turístico y recreativo de los cenotes de la RGH, ésta no está bien contextualizada.

Los SE que brindan los cenotes son el resultado de las interacciones físicas, químicas y biológicas que permiten mantener la calidad del agua. Sin embargo, el aumento de las actividades antrópicas puede limitar esta capacidad y por lo tanto afectar los servicios que este ecosistema que brinda a los humanos; los cambios en la calidad del agua de los cenotes afecta la vida acuática y los servicios ecosistémicos que proporciona el acuífero.

Las personas saben que el acuífero que sirve de base para consumo humano provee igualmente un atractivo turístico, recreación, cultura, es decir proporciona servicios ecosistémicos; el valor intrínseco de la Reserva Geohidrológica del Anillo de Cenotes puede determinarse a partir de la disposición de la gente a pagar por los servicios ecosistémicos que esta brinda, sustentada en la percepción de beneficio que reciben del uso turístico y recreativo de los cenotes de la zona.

## **Objetivo General**

Establecer una línea base para la valoración de los servicios ecosistémicos del acuífero de la Zona de Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes, a partir del estudio de algunos cenotes; para contribuir a la gestión integral del agua subterránea en la Península de Yucatán.

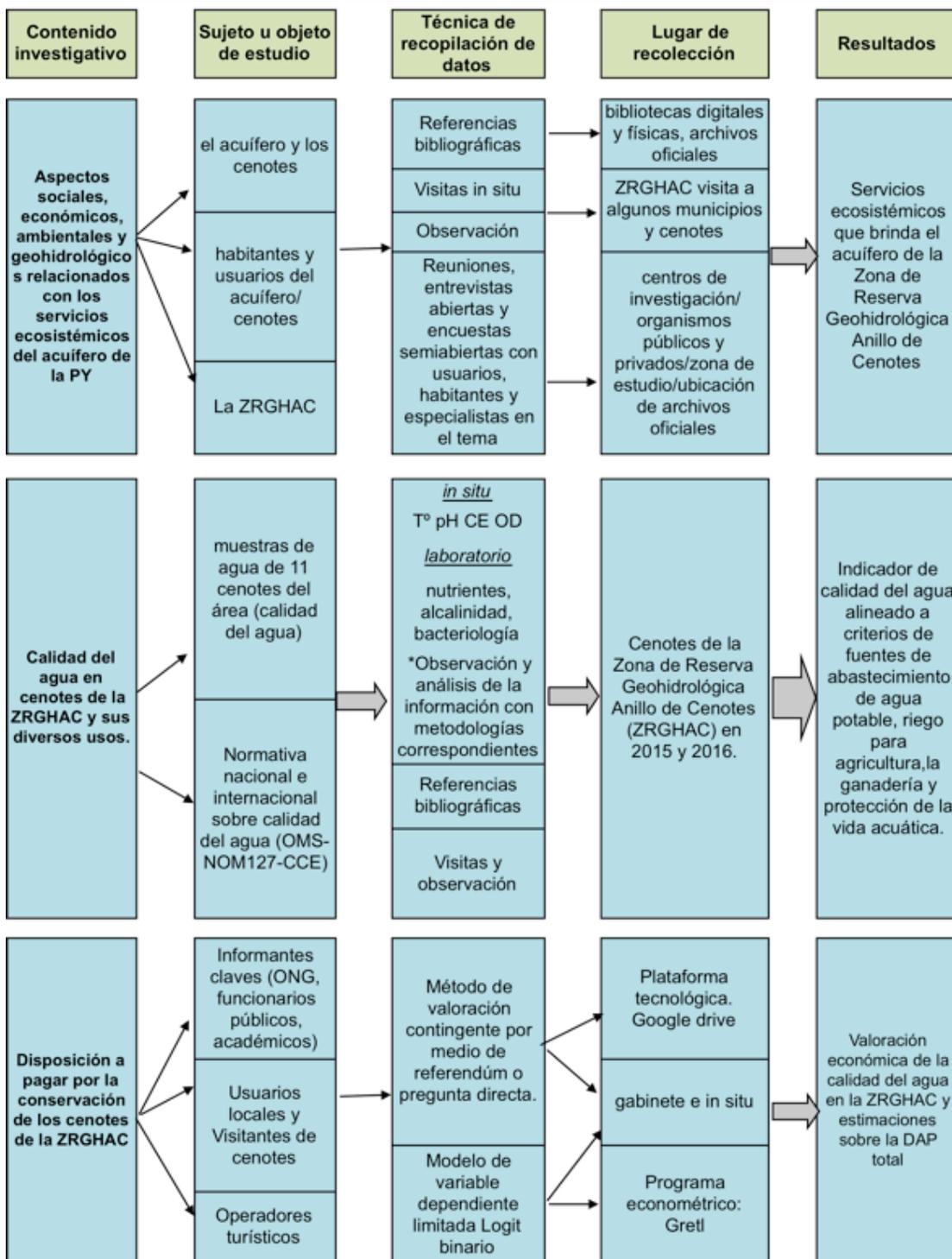
## **Objetivos Específicos**

- Identificar y clasificar los servicios ecosistémicos que proporciona el acuífero en la Zona de Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes realizando una descripción general de cada servicio.
- Establecer la relación de calidad del agua de los cenotes y los servicios ecosistémicos.
- Determinar una valoración económica de la Zona de Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes utilizando el método de valoración contingente.

## **Estrategia experimental**

A continuación se presenta de manera general, un esquema de trabajo para la metodología. En los siguientes capítulos se realizará una descripción detallada de los compromisos asumidos.

## Estrategias metodológicas



## **CAPÍTULO II. Identificación de los Servicios Ecosistémicos que brinda el acuífero**

### **Introducción**

El acuífero de la Península de Yucatán mantiene una elevada diversidad de ecosistemas dependientes de aguas subterráneas por lo que su estudio permite catalogar las funciones y procesos que ocurren en este sistema (Bauer-Gottwein *et al.*, 2011). Si bien es un ecosistema relevante ya que posee uno de los recursos vitales para la especie humana como es el agua dulce, también permite la realización de actividades económicas e interactúa con otros ecosistemas permitiendo una interdependencia entre ellos. La población del Estado de Yucatán tiene en las aguas subterráneas la única fuente de abastecimiento de agua dulce para satisfacer sus necesidades y desarrollar actividades productivas (DOF, 2013), es decir que los servicios ecosistémicos que el acuífero les proporciona son vitales para su supervivencia y el bienestar humano.

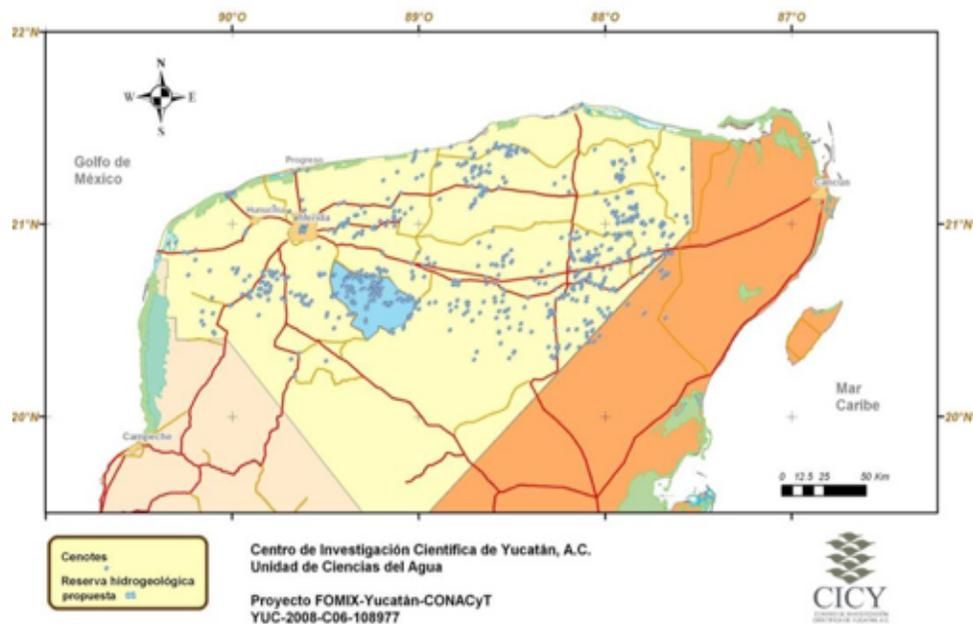
De acuerdo con Escolero *et al.* (2000) el total de agua subterránea estimada extraída de la zona metropolitana de Mérida es de  $3.8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . La Comisión Nacional del Agua, reporta que el volumen oficial de extracción de la Península de Yucatán es equivalente al 1.4% de la precipitación anual; de este volumen el 61% de la extracción es destinado a la agricultura, el 20% para uso doméstico y el 19% para uso industrial (CONAGUA, 2014). Estos usos diversos del acuífero mantienen la actividad económica pero a largo plazo pueden ser limitados por la contaminación o una demanda alta, por lo que se requiere una visión ecosistémica que no sólo permita un beneficio económico sino también un bienestar humano.

El concepto de servicios ecosistémicos surge como herramienta para encaminar la toma de decisiones en el ámbito político hacia la preservación y uso sustentable de los recursos y el mantenimiento del bienestar social (Christensen *et al.*, 1996). Al momento de identificar, clasificar y describir de forma más precisa qué tipo de bienes, servicios o beneficios ofrece un ecosistema se vuelve más sencillo su estudio. Es por eso que en este capítulo el estudio del acuífero con una visión ecosistémica se vuelve el tema central para identificar los servicios ecosistémicos que éste proporciona.

## **Reserva Hidrogeológica del Anillo de Cenotes**

De Marsily (1992), propuso la creación de la figura de “zona de reserva hidrogeológica”, como un instrumento para proteger las zonas de recarga y evitar la contaminación del acuífero; resaltando el hecho que se ha hecho un gran esfuerzo para mejorar la calidad del agua superficial, y que al mismo tiempo la calidad del agua subterránea se ha ido deteriorando. La Península de Yucatán depende para su consumo casi en su totalidad del agua subterránea, es por ello que son necesarios instrumentos que permitan su protección y gestión; por lo que la figura de reserva hidrogeológica planteada por De Marsily (1992) se vuelve relevante. Diversos esfuerzos para establecer reservas hidrogeológicas en la península de Yucatán han sido realizados por diferentes investigadores (Escolero *et al.*, 2000, 2002, 2005), sin embargo dichas iniciativas no tuvieron respuesta por parte de las autoridades.

En 2013, como resultado de la propuesta de zona de reserva hidrogeológica elaborada por Hernández-Terrones *et al.* (2011), dentro del proyecto financiado por los Fondos Mixtos-CONACYT-Gobierno del estado de Yucatán, y fue decretada por parte del Gobierno del Estado de Yucatán, denominándola en el Diario Oficial de la Federación como Reserva Estatal Geohidrológica Anillo de Cenotes. La Reserva se ubica en los Municipios de Seyé, Acanceh, Timucuy, Homún, Cuzamá, Tecoh, Tekit, Tahmek, Hochtún, Xocchel, Hocabá, Sanahcat y Huhí del estado de Yucatán (Figura 6), en tierras pertenecientes al régimen ejidal y terrenos particulares y con una superficie total de 1,312.28 km<sup>2</sup> y un volumen total de 108,200,000 m<sup>3</sup>. La zona de recarga se puede subdividir en la zona norte y sur. La zona sur (Tekit, Tecoh, Homún, Cuzamá, Huhí, Sanahcat y Xocchel) presenta rocas del Eoceno, se encuentra a una altura sobre el nivel del mar entre 18 y 27m. Se encuentra en una selva mediana caducifolia preponderante, con vegetación secundaria y una precipitación entre 900 a 1000 mm al año. La zona norte (Acanceh, Seyé, Hocabá, Hochtún, Timucuy y Tahmek) cuenta con una precipitación media de 800 a 900 mm al año, está formada por rocas del Mioceno-Plioceno, tiene una altura entre 10 y 18m sobre el nivel del mar, con vegetación de selva baja caducifolia en la mayor parte del territorio (COTASMEY, 2015).



**Figura 6. Localización de Zona de Reserva Geohidrológica propuesta por Hernández-Terrones *et al.* (2011)**

La población de estos trece municipios es de 97,704 habitantes (INEGI, 2010). El 48% de la población se encuentra en un rango de edad entre 25 y 59 años, lo que refleja la presencia de población joven con potencial para realizar una actividad económica que permite el crecimiento económico de la región. Con respecto a la educación, alrededor del 15% de la población con 15 años cumplidos es analfabeta. El 46% habla la lengua maya y el español, el resto habla sólo español, lo que refleja una pérdida de identidad o pérdida de sus raíces. (COTASMEY, 2015).

Todos los municipios de la Zona de Reserva Geohidrológica presentan un grado de marginación medio o alto (CONAPO, 2010) (Figura 7). El ingreso máximo de la región es de dos salarios mínimos. Los municipios de Huhí, Timucuy, Hochtún, Tecoh, Xocchel, Cuzamá y Hocabá forman parte de la lista de los 1000 municipios más marginados del país.

Grado de marginación:

■ Alto

■ Bajo

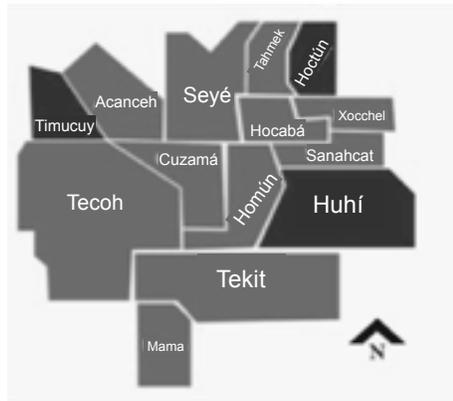


Figura 7. Mapa del grado de marginación en los municipios de la Zona de Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes (COTASMEY, 2015)

La densidad de población promedio de la zona es de 52 habitantes por kilómetro cuadrado. En promedio el 70% de la población de la zona se encuentra en situación de pobreza y en todos los casos se presentan al menos un 10% de pobreza extrema (Figura 8). Solo el 28% de la población se reporta como económicamente activa donde el 73% son hombres y el 27% son mujeres.

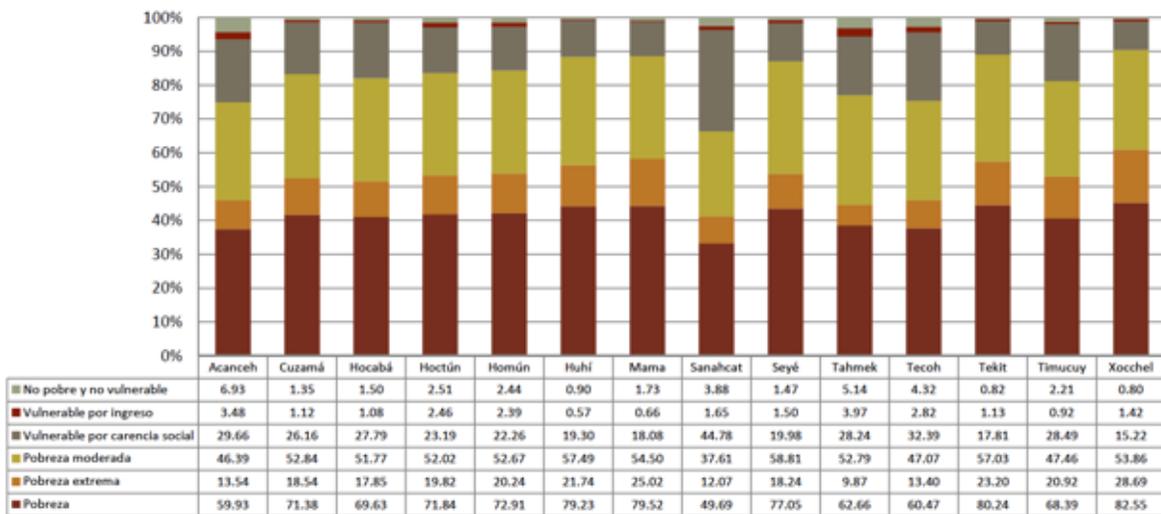


Figura 8. Estado de pobreza de la población de la Zona de Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes (COTASMEY, 2015)

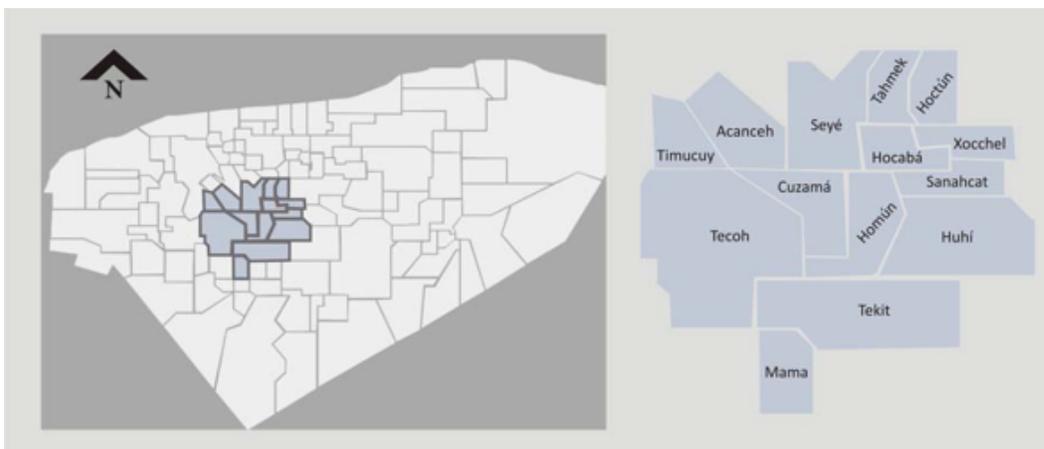
### **Actividades económicas en la ZRGHAC**

Las actividades principales que se desarrollan en los municipios de la ZRGHAC del sector primario son la agricultura y la ganadería (COTASMEY, 2015). Se realiza el cultivo de pastos, maíz de grano, henequén, naranja, limón, papaya, aguacate, toronja, mandarina entre otros. Muchos de estos cultivos son para autoconsumo por lo que no siempre existe una paga monetaria en lo que respecta a la agricultura. El cultivo de zacate si bien no es consumido por los humanos, es un producto que ocupa el primer lugar en hectáreas sembradas (19,617 ha, equivalentes al 74% de hectáreas ocupadas para siembra), sirven de alimento para el ganado modificando a la vez el uso de suelo y con ello la vegetación de la zona (COTASMEY, 2015). En relación a la ganadería, todos los municipios cuentan con espacios para la crianza de cerdos, vacas y aves, principalmente para autoconsumo o venta local. Del mismo modo la apicultura se practica de manera generalizada en toda la zona y es Tecoh quien presenta el mayor número de colonias en la región (6000 colonias) lo cual les permite exportar miel dentro y fuera del país (SEDUMA, 2015). Para el sector secundario las principales actividades de la industria manufacturera son la textil (en 10 de los 13 municipios), la alfarería, la industria de plásticos (COTASMEY, 2015; SEDUMA, 2015).

Las actividades del sector terciario desarrolladas en la zona son: 1) el transporte público y 2) comercio en todos los municipios; 3) la presencia de dos gasolineras: una en Cuzamá y la otra en Homún; 4) los servicios de albañilería reportados en seis de los trece municipios; 5) y la actividad turística. Una de las principales actividades económicas del sector terciario dentro de la ZRGHAC es el Turismo Alternativo. El turismo alternativo busca adaptar la actividad turística a formas menos dañinas para el ambiente y la sociedad. Es coherente y consistente con los valores naturales, sociales y comunitarios que le permiten a turistas y residentes disfrutar de una interacción fundamentada de experiencias mutuamente compartidas (Smith y Eadington, 1992; Pearce, 1992; Bringas y González, 2014). Por esta razón surgen distintas vertientes como el turismo rural, ecológico, de naturaleza, cultural, etnoturismo, de aventura, el ecoturismo, etc. El desarrollo del ecoturismo ha cobrado fuerza en los últimos 30 años. En algunos países, esta forma de realizar turismo ha prosperado de manera importante, tal es el caso de países como Costa Rica, Canadá, Ecuador, Belice, Kenia, Ruanda entre otros quienes han logrado posicionarse como promotores de la conservación de los recursos naturales mediante la actividad turística (Ceballos, 1998). Adicionalmente, tenemos el mercado

nacional que en los últimos 10 años ha incrementado su interés por atractivos naturales y culturales, cambiando sus tradicionales vacaciones de playa, por la aventura de explorar lugares alejados de la vida urbana que puedan brindar una conexión con la naturaleza y el intercambio cultural con habitantes en zonas rurales (Carballo, 2005). De acuerdo al director de Innovación del Producto Turístico de la SECTUR, el turismo de naturaleza atrae a 6.4 millones de visitantes de los 32 millones que arriban a México, es decir que uno de cada cinco turistas que llegan a México es para practicar una actividad vinculada al turismo de aventura, ecoturismo o turismo rural (De la Vega, 2016).

Los cenotes se consideran el principal atractivo turístico en el interior del Estado de Yucatán. El 79% de empresas sociales de turismo alternativo incluyen una visita a cenotes en su oferta (García *et al.*, 2015). Aunque los recorridos a cenotes y cavernas es lo que caracteriza la ZRGHAC en términos de actividades de turismo alternativo, también existen otros atractivos como las zonas arqueológicas, haciendas e iglesias y festividades que refleja parte del valor cultural del sitio a través del patrimonio natural, histórico y cultural de la región (SEDUMA, 2016). Los 13 municipios de la RGHAC representan el 5% de la población total del Estado de Yucatán (Figura 9). La densidad de la población es de 52 habitantes por km<sup>2</sup> y el 70% de la población vive en localidades de menos de 5000 habitantes (COTASMEY, 2015).



**Figura 9. Zona de Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes decretada (COTASMEY, 2015).**

El Anillo de Cenotes en el Estado de Yucatán está dividido en un área de recarga del acuífero que abastece a la zona metropolitana, un área de tránsito, así como la zona de descarga que se encuentran cercanas a la costa. Particularmente la Zona de Reserva

Geohidrológica se ubica en la zona de recarga. Estas zonas se conforman por subzonas que a su vez se constituyen por municipios (DOF, 2013). Esta división geopolítica facilita la gestión y líneas de acción con los municipios aunque de acuerdo a las funciones y procesos biofísicos e hidrogeológicos del acuífero es difícil delimitar una frontera.

De manera general el volumen extraído de agua del Anillo de Cenotes para diversos usos es de 495 hm<sup>3</sup> de los cuales el 42% es aprovechado por el estado de Yucatán. En las Figura 10 se muestran los principales usos del agua en el Anillo de Cenotes, y en la Figura 11 los principales usos del agua en las subzonas 1 y 2, donde se encuentra la Zona de Reserva Geohidrológica. La actividad agrícola y usos múltiples representa una extracción de 257 hm<sup>3</sup>/año, el sector público urbano 197 hm<sup>3</sup>/año, el sector industrial 25.6 hm<sup>3</sup>/año, el de servicios extrae 7.4 hm<sup>3</sup>/año y el sector pecuario 6.8 hm<sup>3</sup>/año. En relación al volumen extraído en las subzonas 1 y 2, la actividad agrícola y usos múltiples representa 153 hm<sup>3</sup>/año, el sector público urbano de 187 hm<sup>3</sup>/año, el sector industrial 25.6 hm<sup>3</sup>/año, el de servicios 7.3 hm<sup>3</sup>/año, y el pecuario de 2.8 hm<sup>3</sup>/año (DOF, 2013).

### Usos del agua en el Anillo de Cenotes (494, 933 hm<sup>3</sup>/año)

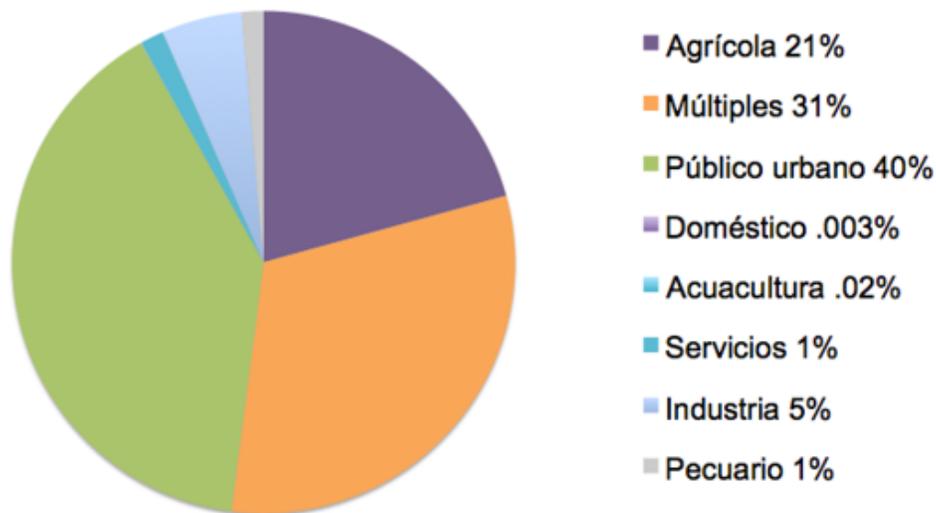


Figura 10. Gráfica sobre los usos del agua en el Anillo de Cenotes (hm<sup>3</sup>/año) (DOF, 2013).

### Usos del agua ZRGHAC ( 379,092 hm<sup>3</sup>/año)

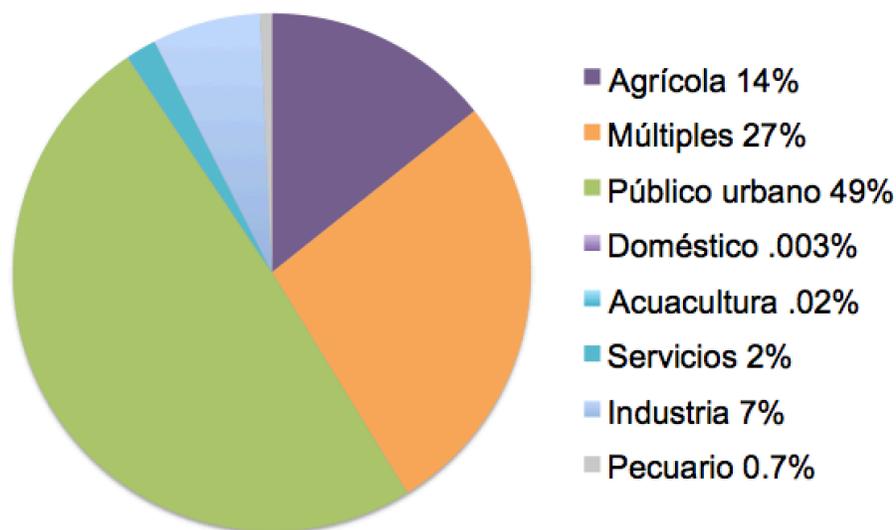


Figura 11. Gráfica sobre los usos del agua en la Zona de Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes. (hm<sup>3</sup>/año) (DOF, 2013).

En las figuras 10 y 11 se presentan los usos principales, ya que el uso doméstico y de acuacultura representan menos del 0.03%. Existe una relación directa entre la cantidad de usuarios y el volumen requerido para cada uso, aunque también influyen las prácticas de cuidado del agua en cada rubro así como la demanda necesaria para cada actividad de acuerdo a su naturaleza.

En la tabla 2, se presenta un comparativo de la población urbana y rural de algunas localidades de la reserva y la ciudad de Mérida, y refleja un contraste en el nivel de analfabetismo entre los habitantes de algunos municipios que conforman la reserva y los habitantes de la ciudad de Mérida (INEGI, 2015; COTASMEY, 2015). También se observa que el 42.5% de la población radica en la capital del Estado y coincide con las figuras 10 y 11 donde el uso público urbano utiliza el mayor volumen de agua abarcando casi el 50% del recurso hídrico. Actualmente la ciudad de Mérida cuenta con 892,363 habitantes de los 2 097,175 habitantes que tiene el Estado de Yucatán (INEGI, 2015).

Las diferencias poblacionales reflejan que la mayor demanda del recurso agua le corresponde a Mérida debido al número de habitantes, a la infraestructura de distribución de agua potable, y la industria ubicada dentro de la zona urbana.

**Tabla 2. Comparativo de población total y analfabetismo de algunos municipios de la ZRGHAC y Mérida.**

<b>Municipios</b>	<b>Población total (habitantes)</b>	<b>Población analfabeta (%)</b>
Sanahcat	1,945	16.86
Cuzamá	5,181	13.32
Tekit	10,232	17.42
Tecoh	17,609	15.87
Mérida	892,363	3.20

Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI, 2015; COTASMEY y SEDUMA, 2015.

## **Metodología**

Para la identificación de los servicios ecosistémicos que provee el acuífero de la ZRGHAC, se siguió la estrategia metodológica del Capítulo I y que consistieron en: 1) revisión bibliográfica sobre las características sociales, demográficas, actividades económicas principales, aspectos generales hidrológicos, culturales, vegetación, biodiversidad, especies endémicas e información relevante de la zona, 2) realización de campañas de muestreo y 3) se trabajó en el diseño y aplicación de una encuesta. La ZRGHAC es parte del acuífero de la Península de Yucatán, y para su caracterización se estudiarán a través de los cenotes.

## **Trabajo de campo**

Se seleccionaron 11 sitios de estudio, localizados en 4 de los 13 municipios de la reserva (Sanahcat, Tekit, Tecoh y Cuzamá). Se realizaron dos campañas de campo (mayo de 2015 y mayo de 2016), en las que se documentaron los distintos usos que los habitantes les dan a los 11 cenotes, se identificaron características principales. Se interactuó con los habitantes para conocer más sobre su vida diaria y su relación con el agua. Paralelamente durante estas visitas se obtuvieron muestras para determinar la calidad del agua, cuyos resultados se presentan en el Capítulo III. Se realizó un recorrido turístico a tres cenotes en el municipio de Cuzamá.

## Diseño de muestra

Como nuestro universo de población es mayor a 100,000 habitantes, tamaño de muestra se calculó utilizando la fórmula propuesta por Bartlett *et al.* (2001) y Cochran (1977):

$$n = \frac{z^2 * p * (1 - p)}{e^2}$$

El número de encuestas necesarias a realizar es de 270 para mantener los niveles de error definidos de la siguiente manera:

z= un nivel de confianza del 90% equivalente a un valor de z=1.645

p= proporción de población que se espera encontrar, como se desconoce se le asignó un valor de 50%

e= margen de error máximo del 5%

El error estándar de la muestra se calculó de acuerdo a Weisberg (2005) con la fórmula:

$$\sqrt{(p(1 - p))/(n - 1)}$$

El margen de error máximo es calculado de acuerdo a  $0.98/\sqrt{n - 1}$  o aproximadamente  $1/\sqrt{n}$

## Diseño de encuesta y aplicación

Durante 2015 se diseñó una encuesta, la cual fue aplicada en el primer semestre del 2016. La encuesta se dividió en tres apartados: 1) datos generales, 2) conocimiento general del acuífero (gustos y preferencias) y zona de estudio; y 3) escenario hipotético (valoración económica). El instrumento se compone de preguntas abiertas, de opción múltiple y algunas preguntas cerradas. La encuesta es no probabilística es decir es intencional, casual y por cuotas (Mandujano, 1998), ya que el objetivo fue contar con la participación de un segmento específico de los usuarios del agua de la zona de estudio. Se seleccionó a este segmento de la población de Mérida, porque serán los habitantes de la capital del Estado quienes deberán pagar por mantener los servicios ambientales que proporciona la ZRGHAC. La población objetivo debería cumplir con lo siguiente:

- Vivir en Yucatán, logrando que la ciudad de Mérida se viera representada en al menos un 80% de la muestra (250 de los ~300 encuestados).

- Cumplir con la edad mínima de 18 años para que pueden trabajar de forma legal y que tengan la oportunidad de recibir una remuneración económica por su trabajo (261 de los ~300 encuestados)
- Que alguna vez hayan visitado un cenote asegurando una experiencia vivencial en el mismo (253 de los ~300 encuestados).

Para efectos de este Capítulo, los datos presentados son los relacionados al conocimiento general del acuífero (gustos y preferencias) de la zona de estudio. La forma de aplicación de la encuesta fue de manera digital a través de Google Docs (Figura 12)

**Encuesta sobre la valoración del acuífero de la Zona de Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes en Yucatán.**

Buen día, le solicitamos su apoyo contestando las siguientes preguntas enfocadas a la valoración del acuífero. Este ejercicio es con fines académicos por lo que sus resultados son confidenciales y de uso exclusivo para la tesis de la estudiante de maestría en Ciencias del Agua del Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY), Myrna López.

**\* Required**

**Nombre completo**

Your answer \_\_\_\_\_

**Sexo \***

Mujer

Hombre

**Fecha \***

MM DD YYYY

**Figura 12. Portada de la encuesta diseñada en Google Docs.**

La encuesta está conformada de la siguiente información y preguntas:

- Nombre completo:
- Correo electrónico
- Sexo
- Fecha
- Edad
- Profesión
- Escolaridad (se muestran opciones)
- ¿Cuál es su ingreso mensual familiar aproximado? (se incluyen rangos de ingreso)

- ¿Cuál es el número de integrantes de su familia?
- Nombre del municipio donde radica actualmente:
- Nombre de la ciudad:
- ¿Ha visitado alguna vez un cenote, cueva o caverna? (respuesta Si o No)
- ¿Cuál de las siguientes opciones considera que tiene mayor impacto en la preservación y cuidado del acuífero?
- ¿Considera que los cenotes, cuevas y/o cavernas proporcionan bienes y servicios necesarios para la población?
- ¿Usted identifica la Zona de Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes en Yucatán decretada por el Diario Oficial en 2013?
- ¿Cuáles bienes o servicios considera que los cenotes, cuevas o cavernas de esta reserva les brinda a los seres humanos? Puede seleccionar más de una opción.
- ¿Cuál de estos servicios considera que es el más importante?
- ¿Cree que la población que se ve beneficiada con los servicios que proporcionan los cenotes, cuevas y cavernas deban pagar una cuota extra para que la zona de reserva (ZRGHAC) se mantenga limpia y disponible en los próximos 10 años?
- ¿Cuánto estaría dispuesto a pagar mensualmente para que los cenotes, cuevas y/o cavernas se mantengan limpios los próximos 10 años? (se incluyen rangos)
- ¿A cuál de estas opciones le gustaría que se destinara su pago?
- Comentarios adicionales

Se aplicaron ~300 encuestas dirigidas a habitantes de la zona urbana, es decir de la ciudad de Mérida; también se encuestaron expertos en el tema, funcionarios de los municipios de la zona de estudio, académicos, representantes de la sociedad civil y algunos integrantes del COTASMEY quienes también conocen las necesidades del sitio desde distintos escenarios; se entrevistó a algunos operadores turísticos de los cenotes más reconocidos como atractivos turísticos de la ZRGHAC. También se realizó una sesión con algunos operadores turísticos de los cenotes Dzapacal, Chelentún, Santa Cruz, Bolonchoojol y Chansinic´che, reconocidos como atractivos turísticos de la ZRGHAC aunque los operadores turísticos no se consideraron dentro del análisis de la muestra. Este ejercicio permitió documentar la percepción de los principales beneficiarios del acuífero y los servicios ecosistémicos identificados.

El porcentaje de error fue del 5%, ya que 5 encuestados viven actualmente en Quintana Roo pero nacieron en Mérida, 6 encuestados más radican en otros estados del país, pero han visitado los cenotes y participaron en la reunión del COTASMEY que los engloba como interesados en el tema. También hay 9 encuestados que a pesar de reportar que radican en Mérida no han visitado un cenote; todos ellos estudiantes. Otras características que se consideraron fueron que los encuestados tuvieran acceso a internet y supieran manejar una computadora o Tablet, aunque esta situación no fue necesariamente restrictiva ya que en ocasiones se aplicaron encuestas presenciales para lograr una mayor participación. El tamaño de muestra fue semejante a la encuesta aplicada por la considerando que existen otros estudios como el de SEDUMA (2011), sobre Saneamiento y Manejo integral de Cenotes en donde se recopilaron 277 encuestas, el objetivo de este estudio fue obtener la disposición a pagar de los usuarios de los cenotes. Con los resultados obtenidos se procedió a identificar los servicios ecosistémicos que brinda el acuífero de la ZRGHAC, clasificándolos de acuerdo con el MEA (2005).

## **Resultados**

### **Servicios ecosistémicos que proporciona el acuífero**

Después de realizar un análisis técnico multidisciplinario de la información disponible sobre temas relacionados con el acuífero y los cenotes se contextualiza esta información identificando como beneficios provenientes del acuífero los siguientes servicios ecosistémicos (culturales, de provisión, regulación y sustento) identificados en la ZRGHAC, de acuerdo con la revisión bibliográfica, las visitas y entrevistas realizadas, tomando como referencia la clasificación que realiza el MEA (2005) y lo expuesto por Barbier *et al.* (2011). Al final de la descripción se presenta la Tabla 6 como un resumen de los servicios con sus funciones y procesos principales de cada servicio ecosistémico para los componentes claves y los cambios en los ecosistemas derivados de la actividad antropogénica.

- Turismo y recreación por la visita a cenotes
- Educación ambiental
- Investigación
- Cosmovisión Maya asociada a los cenotes, grutas o cavernas
- Agua para consumo humano

- Agua para riego agrícola
- Agua para uso pecuario
- Conducto y/o transportación de agua
- Barrera contra la intrusión salina
- Depuración de masas de agua
- Recarga y captación de agua de lluvia
- Preservación de biodiversidad
- Mantenimiento de cobertura vegetal

### *Servicios culturales*

#### 1. *Turismo y recreación:*

El turismo alternativo constituye una oferta importante del Estado de Yucatán, destacando las bellezas naturales escénicas y culturales, que brindan las grutas y cenotes como parte del acuífero (Tabla 3). La presencia de dolinas es característica de toda la Península Yucatán y la visita a cenotes es uno de los principales atractivos turísticos en el interior de este estado. El 79% de empresas sociales de turismo alternativo lo incluyen en su oferta (García *et al.*, 2015). En éstos se realizan actividades acuáticas como: nado, snorkel, kayak, rappel y espeleobuceo. En torno a estos paradores turísticos también se realizan otras actividades como: tours en trucks o bicicletas, camping, degustación de gastronomía típica, compra de artesanías y visitas a zonas arqueológicas, templos, vestigios, conventos y/o iglesias. Las visitas también incluyen atractivos culturales intangibles como: ceremonias religiosas, festividades, saberes, usos y costumbres mayas.

En este trabajo se identificaron un total de 26 sitios que tienen como principal atractivo turístico los cenotes o grutas dentro de la zona de Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes, sin considerar la Laguna Yalahau que no fue tomada en cuenta ya que no entra en la clasificación de cenote. Los 26 sitios incluyen recorridos o rutas que ofertan servicios turísticos. Seis de estos sitios se conforman de dos a trece cenotes, los cuales se comercializan en un mismo tour. Hay cenotes que de manera aislada cobran la entrada para disfrutar un único sitio. Los paradores turísticos cuentan con la infraestructura necesaria para acceder a través de carreteras, caminos de terracería, veredas para bicicletas o motocicletos e incluso los trucks, adicionalmente algunos sitios poseen estacionamientos, escaleras, cuerdas, sanitarios, señalamientos, áreas de descanso, palapas y senderos en general que facilitan el descenso a los cuerpos de agua y hacen

más seguro el viaje. La zona de manera general carece de establecimientos para hospedaje, se identificaron cuatro hoteles en los 13 municipios con una capacidad de 8 a 20 habitaciones. Se identificó dos sitios que ofrecen el servicio de camping para pernoctar en las instalaciones, los cuales cuentan con vestidores y sanitarios que requieren de una infraestructura específica para el tratamiento de aguas residuales y evitar las descargas en los mismos cuerpos de agua donde se realizan las actividades turísticas.

Una de las poblaciones líder en el desarrollo de actividades turísticas relacionadas con el acuífero es la localidad de Chunkanán en Cuzamá, quien a través de dos cooperativas operadoras de tours conformadas por habitantes de la zona, brindan un servicio turístico que contempla la visita a tres cenotes con un costo de \$250 pesos por truck con capacidad entre 3 y 4 personas. En 2012 obtuvieron una derrama promedio anual de \$130,000 pesos y un promedio de 2,080 visitas al año en ambas Cooperativas (SEDUMA, 2015). En 2016 se entrevistaron a integrantes de ambas cooperativas. En la Cooperativa “3 Cenotes” el precio se incrementó entre \$50 y \$100 pesos mexicanos con respecto a 2012, quedando una tarifa entre \$300 y \$350 pesos por truck, precio que varía según la temporada, el número de visitantes, la nacionalidad, etc. La Cooperativa reporta aproximadamente 300 visitantes al día en temporada alta; y en temporada baja entre 40 y 70 visitantes. Los socios reportan una inversión de 3 millones de pesos en infraestructura y se encuentran en este negocio desde hace 7 años. También se realizó una entrevista con la Cooperativa “Chunkanán”, la integran 32 socios hombres que pertenecen al Ejido Cuzamá, Hacienda Chunkanán, y se dedican a esta actividad desde hace dos décadas.

Se observó que existe un beneficio directo a los familiares de los socios, ya que existen socios que son familiares (padre, hijo, sobrinos). Existe un estrecho vínculo con los servicios de transportación (trucks) ya que son los medios de transporte que trasladan a los visitantes de un cenote a otro. La SEDUMA (2015) reporta que la Cooperativa de trucks de Cuzamá está conformada por 47 socios y la Cooperativa de trucks de Chunkanán por 33 socios y que sus ingresos económicos están incluidos en la tarifa de \$350. Otro servicio de transportación independiente son los bici-taxis que trasladan a los visitantes del centro de Cuzamá al paradero turístico, sin embargo se desconoce la derrama económica que generan. También existe la opción de visitar cenotes o grutas de manera individual, los cuales se encuentran dentro de casas particulares o territorio ejidal, el costo de entrada oscila entre \$15 y \$25 pesos por cenote por persona. Algunos ofrecen

la opción de pernoctar en casas de campaña y el uso de las instalaciones puede tener un costo adicional. La zona cuenta con una oferta potencial importante ya que existen cenotes sin explorar. Es importante resaltar que los habitantes de la zona identifican como una oportunidad de negocio la visita a los cenotes pero carecen de una visión administrativa y de capacitación como prestadores de servicio. Cabe mencionar que en siete de los once cenotes estudiados se realizan actividades turísticas: 1) Kalcuch, 2) Tanimax y 3) Noh Mozón en el municipio de Tecoh, 4) Santa Cruz, 5) Dzapacal y 6) Chelentún en en Cuzamá y 7) Bebelchén en Sanahcat.

Tabla 3. Atractivos e infraestructura turística por municipio de la Zona de Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes (en azul los relacionados con el agua)

Municipio	Atractivos turísticos	Infraestructura turística
Acanceh	Zona arqueológica Acanceh	Parador turístico: restaurante para 200 pax, estacionamiento, alberca, áreas verdes y palapa.
	Jardín Medicinal	
	Iglesia de la Virgen de Guadalupe	
	Natividad	
	Hacienda Tepich Carrillo	
	Feria anual	Hotel Palomino de 20 hab
Cuzamá	Ruta 3 cenotes (Cooperativa)	Cooperativa trucks de Cuzamá
	Ruta Cenotes: Santa Cruz Dzapacal y Chelentún (cooperativa Bolonchojool)	
	Cenote Papakal	Cooperativa trucks de Chunkanan
	Cenote Tzacala	
	Cenote Ak tun ha	
	Iglesia de Santiago Apostol o Templo de la Trinidad	Restaurante Dzapacal (100 pax)
	Iglesia de San José de la Montaña (estilo gótico)	
	Iglesia de la Virgen de la Concepción	
	Hacienda Eknakán	
	Hacienda Chunkanah	
	Natividad	
	Fiesta tradicional de Chunkanan en honor a la virgen de la Concepción	
Feria anual		
Fiesta tradicional de Eknakan en honor a San José de la Montaña		
Hocaba	Iglesia de San Francisco de Asís	
	Fiesta tradicional en honor a San Francisco de Asís	
Hoctún	Cenotes y grutas E'bis (locales)	
	Iglesia de San Miguel Arcangel	
	Feria anual	
Homún	Cenote Yaxbacaltun	
	Cenote Oxolah	
	Cenote Balmil	
	Cenote Tzajunkat	
	Cenote Santa Rosa	
	Laguna Yalahau	
	Zona arqueológica Yalahau	
	Gruta Che Che Bak	
Gruta y cenote Santa María		
Huhí	Iglesia de San Pedro y San Pablo	Infraestructura trunca para acceso a 3 cenotes: Chem bech, Ixi-ha, Ucil.
	Feria de bolsas	
	Feria tradicional en honor a San Pedro y san	
	Feria anual	
Sanahcat	Cenote Sanahcat	
	Grutas de Sanahcat	
	Iglesia de la Virgen de la Asunción	
	Fiesta tradicional en hr a la virgen de la Asunción.	
	Feria anual	

Fuente: Elaboración propia con información de las Visitas de Campo realizadas y de Inventarios de brindados por la SEDUMA

Tabla 3. Continuación ...

Municipio	Atractivos turísticos	Infraestructura turística
Seye	Iglesia de San Bartolomé Apóstol	
	Hacienda Bakoop	
	Desfibradora Xcehus	
	Fiesta tradicional en honor a San Bartolomé Apóstol	
	Feria anual	
Tahmek	Iglesia de San Lorenzo	
	Fiesta adicional de San Lorenzo	
	Festival del Globo	
	Fiesta Tradicional a la virgen de la Asunción.	
Tecoh	Zona arqueológica Mayapán	Hotel Naluum cuenta con 10 cabañas, restaurante y áreas de descanso.
	<a href="#">Cenote Kalcuch</a>	
	<a href="#">Cenote Tanimax</a>	
	<a href="#">Cenote Nohomozón</a>	
	<a href="#">Cenote Tza Itza</a>	
	<a href="#">Cenote Tecoh</a>	
	<a href="#">Cenote de la plaza principal</a>	
	<a href="#">Cenote Xcanhacan</a>	
	<a href="#">Cenote Dzul-Ha</a>	
	<a href="#">Gruta los 13 cenotes de Tzabnah</a>	
	Iglesia de la Virgen de la Asunción	
	Hacienda Itzincab	
	Hacienda Tekik o Xcanhakán	
	Hacienda Sotuta de Peón	
Fiesta tradicional en honor a la Virgén de la Asunción y Virgen de la Candelaria		
Feria anual		
Tekit	<a href="#">Cenote Timuul</a>	Hotel Posada Cansacbe cuenta con 8 habitaciones
	Iglesia de San Antonio de Padua	Restaurante El Arco de Piña (30 pax)
	Hacienda San Antonio X`pip	
	<a href="#">Ruta Cansacbe (cenote Kekenchen y aguada Caná)</a>	
Timucuy	Iglesia de la Virgen de Asunción	
	Fiesta por celebración de haber encontrado a la Virgen de la Asunción	
	Fiesta tradicional en honor a los Tres Reyes	
Xocchel	Hacienda Bohee	
	Iglesia de San Juan Bautista	
	Fiesta tradicional en honor a San Juan Bautista	
	Fiesta tradicional en honor a Santo Cristo del Amor	

Fuente: Elaboración propia con información de las Visitas de Campo realizadas y de Inventarios de brindados por la SEDUMA

## 2. Educación Ambiental:

Las iniciativas del sector académico y público para lograr el decreto de la Reserva Estatal Geohidrológica Anillo de Cenotes en 2013. En el decreto se manifiesta que “los servicios de los ecosistemas garanticen la permanencia y enriquecimiento del patrimonio biocultural

del cual los pueblos indígenas y las comunidades locales son custodios y de lo que también depende el bienestar humano” (DOF, 2013). Hasta ahora la educación ambiental sobre la protección, restauración y preservación de los cenotes, grutas y cavernas así como los demás ecosistemas que se relacionan con el acuífero se ha difundido a través de algunos spots televisivos, talleres del cuidado del agua, campañas de limpieza, las actividades que desarrolla el COTAS, y foros educativos relacionados con el tema. Estos son canales que se encuentran en desarrollo para resaltar y preservar la riqueza biocultural e hidrogeológica del acuífero en el presente y para las generaciones futuras.

El Reglamento de la Ley de Protección al Medio Ambiente en Materia de Cenotes, Cuevas y Grutas, la Alianza de Colaboración Intermunicipal para la Gestión Integral de la ZRGHAC, el mismo Decreto de la Reserva, la alineación a objetivos de autoridades estatales, federales o internacionales como el Plan Estatal de Desarrollo del Estado de Yucatán, el Convenio sobre Humedales o Diversidad Biológica y la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio contribuyen a la articulación de una visión ecosistémica integral que es necesario implementar. Existen diversos organismos trabajando en actividades enfocadas al cuidado, uso y manejo del recurso hídrico en la zona. Estas acciones comprometen la participación de la sociedad en materia de sensibilización y valoración de su entorno.

Se destacan igualmente esfuerzos de la sociedad organizada. Diversas asociaciones civiles que antes de la declaración de la ZRGHAC realizaron actividades de educación ambiental como talleres sobre el cuidado del agua y para evitar la contaminación, consultas públicas, reforestación, limpieza de pozos, cuidado de especies endémicas y/o en peligro de extinción. Un ejemplo es Niños y Crías, A.C., que ha trabajado desde hace más de ocho años en el Estado de Yucatán. En relación al agua, tienen campañas de difusión de spots de televisión dirigidos a los habitantes de la ciudad de Mérida como principales usuarios del recurso y principales responsables de la generación de las aguas residuales. También se resalta la participación del Colectivo Na’lu’um quienes han realizado un labor de sensibilización con talleres relacionados al cuidado del agua con habitantes de la zona.

### 3. Investigación:

Diversas instituciones académicas y centros de investigación públicas y privadas tanto nacionales como internacionales, realizan investigación en el área, con temas relacionados con biodiversidad, calidad de agua, hidrogeología, ecología, turismo, arqueología, geología, geofísica y gestión del agua por mencionar algunas. La integración de nuevas disciplinas al estudio de la zona fortalece su desarrollo y marca el punto de partida de nuevos descubrimientos obteniendo un pronóstico más certero sobre el futuro de la zona. El COTASMEY, órgano auxiliar del Consejo de Cuenca de la Península de Yucatán, ha logrado caracterizar la zona de reserva por municipio, documentando monitoreos realizados por diversas instituciones, conociendo ubicación exacta, parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos de algunos cenotes de la zona. La generación de conocimiento sobre los servicios ecosistémicos que brinda el acuífero kárstico de la Península de Yucatán permite una mejor interpretación de los procesos y funciones que ocurren en este delicado y complejo sistema desde una visión más integral.

### 4. Cosmovisión Maya asociada a los cenotes, grutas o cavernas:

Los cenotes, grutas o cavernas en la Península de Yucatán han sido para las culturas prehispánicas y en la actualidad reconocidos como lugares ceremoniales, de abastecimiento y en algunos casos de resguardo, y han permitido a la cultura Maya su persistencia a través del tiempo. La planificación de ciudades mayas desde el Preclásico superior hasta el Posclásico tardío se realizaba con una dependencia casi absoluta de la existencia de cavidades naturales permitiendo que existan hasta el día de hoy asentamientos humanos en toda la zona (Brady y Villarejo, 1993).

Las cuevas se conciben como puntos de entrada al inframundo, asociadas con la lluvia, la fertilidad y la abundancia. En algunos casos se consideran como espacios sagrados con connotaciones de poder y abundancia que se encuentran directamente asociados a alguna forma arquitectónica. En ellos se realizan ritos religiosos, aunque también se identifican como depósito de agua comunes, son empleados en ceremonias y para desprenderse de los muertos; también han sido utilizados como lugares de refugio y como basureros (Villarejo y Klemm, 1992). En tiempos de la conquista se descubrieron 100 ídolos dentro de cuevas a quienes se les quemaba copal y se les ofrecían sacrificios para obtener lluvia, cosecha y buena caza (Scholes y Adams, 1938). En algunas cavernas de

Yucatán aparecen caras y cruces asociadas a la presencia de agua (Villarejo y Sánchez, 1991).

En un contexto lingüístico existen términos mayas que siguen vigentes en la actualidad como “*Haltunes*” que significa “piedras de agua” que son contenedores de cerámica utilizados para la captación de agua con fines domésticos y ceremoniales, estos recolectaban el agua que gotea de las estalagmitas (Villarejo y Klemm 1992). El antiguo uso maya del término “*Zuhuy hay*” se interpreta como “agua incontaminada” o “virgen” para ceremonias religiosas como el rito de pubertad en la que se untaba a los muchachos con el agua virgen (Villarejo y Klemm, 1992). El Obispo Francisco de Landa (Landa, 1982) relata que esta agua “era traída de los cóncavos de los árboles o de las piedras del monte donde no llegase la mujer”. Villarejo y Klemm (1992) documentan una ceremonia de “...petición de lluvias en Calcehtok, Yucatán en la que el *hierbatero* se coloca frente a una vasija llena de *agua virgen* que debía proceder de un pozo o de una gruta. Tras el rezo de diversas oraciones este líquido se vertía en otro recipiente y era hervido, como paso previo a la elaboración del *balché* (bebida ritual maya)...” Otro término maya asociado al agua y los cenotes son los “*chultunes*” que se conocen como cavidades artificiales situados bajo plataformas o estructuras, lo que hoy en día reconocemos como una cisterna y que los mayas lo conocen como cueva; a diferencia del término gruta que hace mención a cavidades naturales (Villarejo y Klemm, 1992).

Esta cosmovisión vincula costumbres y tradiciones propias de los mayas que han sufrido adaptaciones de acuerdo al contexto social. Las aportaciones de textos como la *Relación de las Cosas de Yucatán* nos permiten conocer una visión sobre el entorno geográfico, religioso, antropológico, etnográfico del siglo XVI y XVII en un contexto de conquista y evangelización (Alba, 2014) y la vez las similitudes con el entorno actual. Este conocimiento transmitido de generación en generación cuenta con un valor importante y se refleja en el patrimonio tangible e intangible de la cultura maya.

Ejemplos del patrimonio tangible maya son las zonas arqueológicas, que en el área de estudio destacan Acanceh, Mayapán, Yalahau, las iglesias y ex-haciendas que fueron construidas sobre vestigios arqueológicos, los utensilios típicos con un valor ceremonial como los *haltunes*, la vestimenta tradicional para distintas ocasiones que también indican estratos sociales y se pueden observar en la población actual de la ciudad de Mérida y en

zonas rurales, las edificaciones tradicionales aún vigentes y que forman parte de la arquitectura actual en los pueblos mayas (albarradas, palapas, chultunes), los sistemas tradicionales de cultivo, los usos y costumbres que son reconocidos y valorados por la estrecha relación con el valor intangible que los acompaña y que siguen siendo practicados. Como patrimonio intangible se identifica el uso de la lengua Maya, el conocimiento de las propiedades de plantas medicinales, el valor de las prácticas ceremoniales sobre todo relacionadas con el agua del acuífero, la gastronomía típica, la música, la literatura, las historias, usos y costumbres de la vida cotidiana, leyendas, rituales y la religión. Este servicio tiene un estrecho vínculo con los servicios ecosistémicos de turismo y recreación ya que involucran experiencias, actitudes, formas de vida, saberes, etc.

#### *Servicios de provisión*

##### *5. Agua para consumo humano:*

Este servicio ecosistémico representa la accesibilidad de agua que provee el acuífero, ya sea a los habitantes de la ZRGHAC que viven a escasos metros de los cenotes o a los habitantes de las zonas urbanas, que si bien cuentan con un sistema de distribución de agua potable, este recurso lo provee el acuífero. La accesibilidad al recurso, el precio del servicio de potabilización y la calidad del agua, son las principales variables que determinan si el servicio se brinda o no. El servicio contempla el uso doméstico individual y colectivo para: la higiene personal, la limpieza de la vivienda y/u otros patrimonios, así como consumo del líquido. En este servicio se identifica una diferencia fundamental entre el uso del recurso hídrico individual, alineado con el Derecho al agua y el uso del recurso para lucrar, es decir que genere alguna remuneración económica como lo es una empresa purificadora de agua, o para la ejecución de procesos de transformación de un producto con un valor económico.

El uso del agua en la industria se considera como de consumo humano cuando el agua se vuelve parte de los insumos fundamentales como materia prima en cualquier proceso productivo. Dentro de la ZRGHAC no se identifican grandes industrias, sin embargo en los 13 municipios que la conforman existen actividades económicas relacionadas con la industria textil (Tabla 4), que requieren una demanda de agua importante y generan también aguas residuales.

En el caso del agua asignada para consumo, en 9 de los 13 municipios existen maquiladoras de distintas dimensiones además de otro tipo de industrias con menor presencia pero que debido a la demanda de agua requerida para sus procesos productivos y las descargas que generan pueden reflejar un impacto en la calidad del agua del acuífero. No existe un registro exacto del agua consumida por individuo o por empresa pero el volumen de agua utilizado para diversos usos es de 379,092 hm<sup>3</sup>/año (DOF, 2013) el cual se distribuye en todos los servicios ecosistémicos.

**Tabla 4. Actividad manufacturera y otras industrias por municipio dentro de la Zona de Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes (SEDUMA, 2015)**

Municipio	Textiles	Otros
Acanceh	Lee Company	Fábrica de Plásticos Acanceh
	Innovaciones Acanceh	
Cuzamá	Maquiladora SUSSET	Bordados
Hocaba		2 empresas de artesanías de sosquil de henequén
Hoctún	Coox Chuy textil y bordados	Manos mágicas "Pintura sobre barro"
Homún	J&G maquiladora	
	Maquiladora	
Huhí	J&G maquiladora	
	Asociación de Maquiladoras de Bolsas	
	3 empresas maquiladoras y fábricas de bolsas para dama y	
Sanahcat		
Seye	Latin American Services	Desfibradora de Henequén
Tahmek		Desfibradora Francisco Villa
		Desfibradora Gustavo Díaz ordáz
Tecoh	Maquiladora A y B Production	Talleres del Mundo Maya (artesanías)
	Fábrica Bony Lingarie SA de CV	Fábrica de pisos de madera
Tekit	10 Maquiladoras	
Timucuy	Maquiladora de gorras	Bordados y punto de cruz
		Urdido de hamacas
		Cooperativa de pescadores
Xocchel		Artesanías con sosquil de Henequén (bolsos, tortilleros, cestos, portavasos, etc.)

#### 6. Agua para riego agrícola:

En los 13 municipios que conforman la ZRGHAC existen 25,965 hectáreas utilizadas en agricultura, representando un 12% del total de territorio decretado como reserva (COTASMEY, 2015). Entre los cultivos principales de la zona se encuentran los pastos que representan el 74% (19,617 ha) de las cosechas, la producción de maíz de grano con el 17% (4,571 ha), en tercer sitio está la producción de henequén con el 5% (1,350 ha), después las plantaciones de naranja con un 2% (427 ha), finalmente el 2% restante se le atribuye al limón, papaya, aguacate, toronja, mandarina, sandía, frijol entre otros (517 ha). Las técnicas principales para la siembra de estos productos es el sistema tradicional de cultivo en la región de “la tumba, roza y quema”, en menor grado la presencia de sistemas riego y en algunos casos el uso de invernaderos (COTASMEY, 2015). El volumen de agua necesario para el riego de la producción agrícola por municipio varía según la técnica utilizada, la demanda de agua del producto y la cantidad a cosechar.

A través de diagnósticos participativos realizados con la SAGARPA en 2005 y entrevistas con autoridades municipales realizadas durante 2014 por el COTASMEY, se lograron cuantificar las toneladas de producción anual promedio por tipo de siembras de maíz y pastos. Los municipios de Tekit (maíz: 686 ton y pastos: 3,060 ton) y Tecoh (maíz: 770 ton y pastos: 2,918 tn ) ocupan el primero y segundo lugar respectivamente mientras que Cuzamá (maíz: 91 ton y pastos: 190 ton) y Sanahacat (maíz:105 ton y pastos:50 ton) ocupan el doceavo y treceavo lugar respectivamente en lo que respecta a los 13 municipios que conforman las reserva. (COTASMEY, 2015).

#### 7. Agua para uso pecuario:

Las actividad ganadera y/o cría de animales en la zona de reserva está clasificada como de autoconsumo, es común observar abrevaderos cercanos a los cenotes que pueden o no tener una bomba de extracción, un pozo y/o una palapa. Además se identificaron tres empresas dedicadas a la industria intensiva dentro y fuera de la zona de reserva: Industrias Bachoco S.A. de C.V., Industrial Avícola Kaki S.A. de C.V. y Kekén Comercializadora Porcícola Mexicana S.A. de C.V. (COTASMEY, 2015). En la Tabla 5 se muestran las granjas o instalaciones relacionadas a la actividad ganadera dentro de los 13 municipios de la ZRGHAC de acuerdo con la Secretaría de Fomento Agropecuario (SEDUMA, 2015). En primer lugar se encuentra la producción de aves como pollos y pavos, le sigue el ganado bovino, después el porcino, en cuarto lugar el ganado ovino y

finalmente la apicultura. En lo que refiere a la productividad de los municipios, Tecoh cuenta con una producción de 1986 cabezas de ganado y 80,057 aves, le sigue Cuzamá con 582 cabezas de ganado y 9,517 aves, posteriormente Tekit con 932 cabezas y 6742 aves. Cabe resaltar que en toda la Península se cosecha miel para la venta local y el autoconsumo; el municipio de Tecoh es quien presenta el mayor número de colonias de abejas (6000 colonias) en la región (SEDUMA, 2015).

**Tabla 5. Instalaciones asociadas a la actividad ganadera por municipio dentro de la Zona de Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes (SEDUMA, 2015)**

Municipio	Ganadería
Acanceh	Granjas Crio
	Grupo Avícola KAKI
Cuzamá	Grupo Avícola KAKI
Hocaba	Grupo porcícola Kekén
Hoctún	Granjas Fernández
Homún	(Sin datos)
Huhí	(Sin datos)
Sanahcat	Granja la Esperanza
Seye	Granja porcícola
	Criadero de pavos
Tahmek	Rancho la Valentina
Tecoh	Granjas Kaki
	Criadero de pavos
	Unidad Porcícola en convenio con KEKEN
Tekit	Criadero de pavos
Timucuy	(Sin datos)
Xocchel	Granjas crío

### *Servicios de regulación*

#### *8. Conducto y/o transportación de agua :*

El sistema kárstico, cuyas manifestaciones más evidentes son los cenotes, cuevas y cavernas subterráneas formadas debido al efecto de disolución de la roca caliza, permite

la conducción de grandes masas de agua dulce (Gondwe *et al.*, 2010; Batllori *et al.*, 2006). La fuente principal de esta agua dulce es la lluvia. Villasuso (2007) muestra la presencia de fallas y fracturas asociadas en la Península de Yucatán, e indica la presencia de aproximadamente 7000 cenotes. De acuerdo a Steinich y Marín (1996) se trata de un acuífero fracturado. Una de las zonas de fracturas más notables a escala regional en la PY es la del Anillo de Cenotes que posiblemente conduce agua subterránea más eficientemente que en sus alrededores. El sistema de conducción de los flujos de agua subterránea en el acuífero de Yucatán es turbulento y aunque se requiere mayor investigación en el tema se ha demostrado que estos conductos se conectan con el mar. (Bauer-Gottwein *et al.*, 2011). Estos flujos preferenciales y subterráneos se asocian con la triple porosidad que consiste en la disociación del dióxido de carbono por erosión química formando un hueco en la roca como primer porosidad, la segunda porosidad se refiere a la presencia de fracturas y fallas y la triple porosidad es cuando estas fallas y fracturas contribuyen a la presencia de éstas y los poros se hacen aún más grandes (Worthington *et al.*, 2001).

#### 9. Barrera contra la intrusión salina:

Este servicio ecosistémico consiste en que el flujo preferencial subterráneo del acuífero en la ZRGHAC impide la penetración del agua de mar hacia la zona continental (Batllori-Sampedro, 2015). La presencia de haloclina en cenotes cercanos a la costa es normal y se puede detectar a través de diferencias en la conductividad, temperatura o pH, o con perfiles de la columna de agua. En este estudio se monitorearon once cenotes, en los cuales no observó la haloclina como se muestra en los perfiles realizados durante las campañas de muestreo, a manera de ejemplo se muestran los perfiles de cuatro cenotes (figuras 13 y 14).

Este servicio ecosistémico puede verse afectado por el volumen de extracción de agua demandado para suministro (industria, sistema de riego intensivo, actividades agropecuarias, etc.) o por un sistema de extracción que llegara a tener contacto con la haloclina y ocasionara la mezcla del agua dulce con salada. Otra posibilidad sería la reducción de precipitación que impediría la recarga del acuífero evitando la construcción de la barrera de circulación vertical de agua dulce contra la salada.

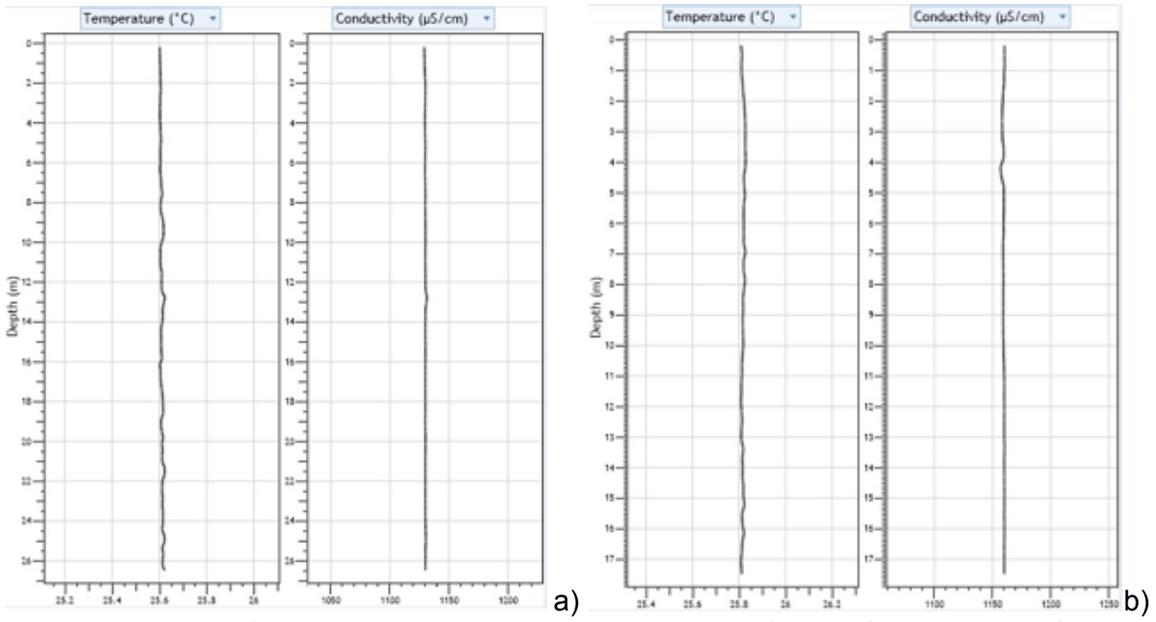


Figura 13. Perfil de la columna de agua en el a) cenote Chelentún, b) Noh Mozón

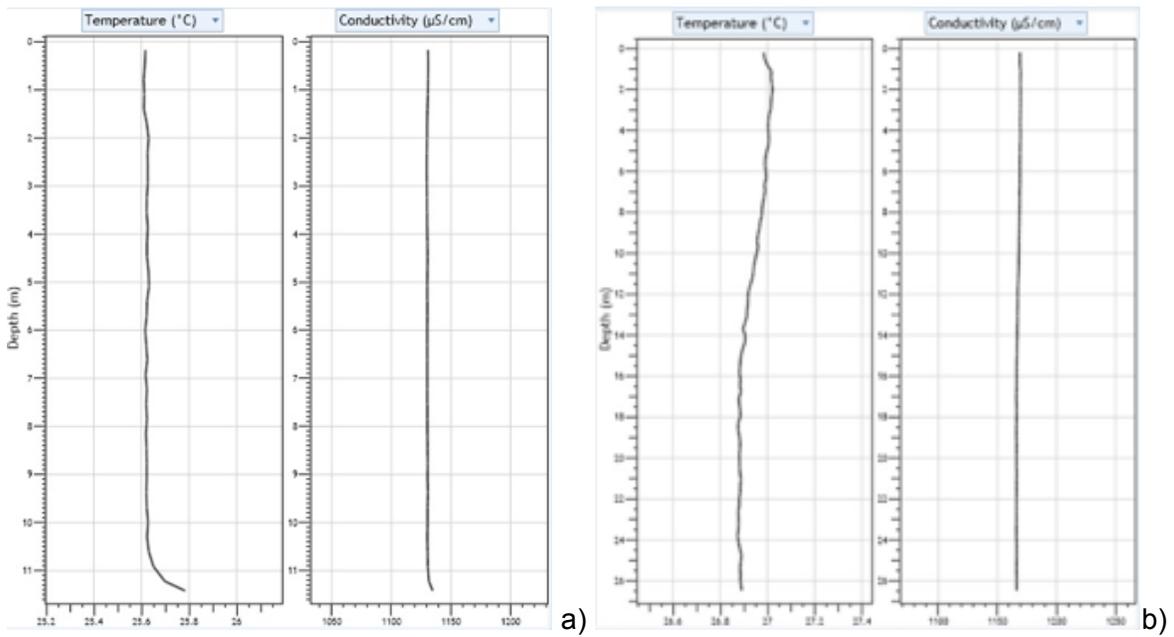


Figura 14. Perfil de la columna de agua en el a) cenote Kalcuch y b) Teabo (Xpacay)

#### 10. Depuración de masas de agua:

El acuífero es capaz de filtrar y descomponer los residuos o cargas orgánicas que se vierten en el agua subterránea y que controla la presencia de patógenos (Batllori-Sampedro, 2015). La infiltración acelera la recarga y permite el flujo de agua; una vez infiltrada el agua, el suelo protege al agua subterránea de los contaminantes propios de un ambiente superficial. Otro factor importante es la interdependencia con otros ecosistemas costeros como los manglares, selva o estuarios quienes llevan a cabo procesos bioquímicos relacionados con el agua. Esta característica contribuye en gran medida a mejorar la calidad del agua del acuífero.

#### *Servicios de sustento*

#### 11. Recarga y/o captación de agua de lluvia:

Además de las fracturas detectadas a nivel regional en un sistema kárstico como lo es el acuífero de la PY, existen fracturas a pequeña escala asociadas con la erosión, la actividad sísmica y la disolución de la roca caliza en donde la lluvia juega un papel fundamental para a su formación (Pacheco *et al.*, 2004; Bauer-Gottwein *et al.*, 2011). El sistema kárstico permite la infiltración rápida del agua de lluvia (Beddows *et al.*, 2007), la cual se almacena en las cavidades formadas por la misma disolución, favoreciendo la recarga del acuífero con agua dulce. La infiltración del agua de lluvia evita posibles encharcamientos e inundaciones y a la vez contribuye al ciclo de nutrientes y agua (Batllori-Sampedro, 2015). El volumen de agua varía según la cantidad de lluvias, de acuerdo a la CONAGUA (2010) el volumen oficial de extracción de agua subterránea en la PY es equivalente el 1.4% de la precipitación anual. Otra fuente de recarga derivada de la lluvia, son las escorrentías superficiales aunque en menor grado ya que la PY es casi plana, con poca elevación sobre el nivel del mar (Bauer-Gottwein *et al.*, 2011). Las características del terreno como el uso de suelo, presencia de cultivos, mancha urbana, o vegetación original puede modificar la magnitud de las escorrentías y su temporalidad.

#### 12. Preservación de Biodiversidad:

La biodiversidad está estrechamente vinculada con los servicios ecosistémicos por la variedad de mecanismos que se llevan a cabo a diferentes escalas espacio temporales. Esta mantiene la estabilidad de los procesos fundamentales que ocurren en los ecosistemas. De acuerdo a Balvanera *et al.* (2016) la biodiversidad está ligada a los

servicios ecosistémicos de tres formas diferentes: (1) como un regulador de funciones en los ecosistemas que permite que se lleven a cabo servicios de provisión, regulación y soporte, (2) como un servicio de provisión ya que las especies juegan el papel de alimento de alguna otra especie; y (3) porque es apreciada por el hecho de ser, más allá de los beneficios que se obtienen de ella.

En el Anillo de Cenotes se distribuyen más de 41 especies silvestres en peligro y más de 15 especies endémicas de la región entre las que resaltan peces de agua dulce, anfibios, reptiles, aves, mamíferos y murciélagos (RAMSAR, 2010) que forman parte de la dinámica del ecosistema en la cadena trófica siendo portadores de materia orgánica a través de sus excretas como es el caso de los murciélagos o contribuyendo a la dispersión de especies acuáticas como el plancton. De la fauna acuática se identifican invertebrados microscópicos como los rotíferos, los cladóceros y los copépodos; destacando que en la PY se encuentran del 30% al 50% de estos invertebrados (Schmitter *et al.*, 2001). Como vertebrados, el pez ciego es una de las especies endémicas representativa de los cenotes que se encuentra en peligro de extinción (Schmitter-Soto, 2006).

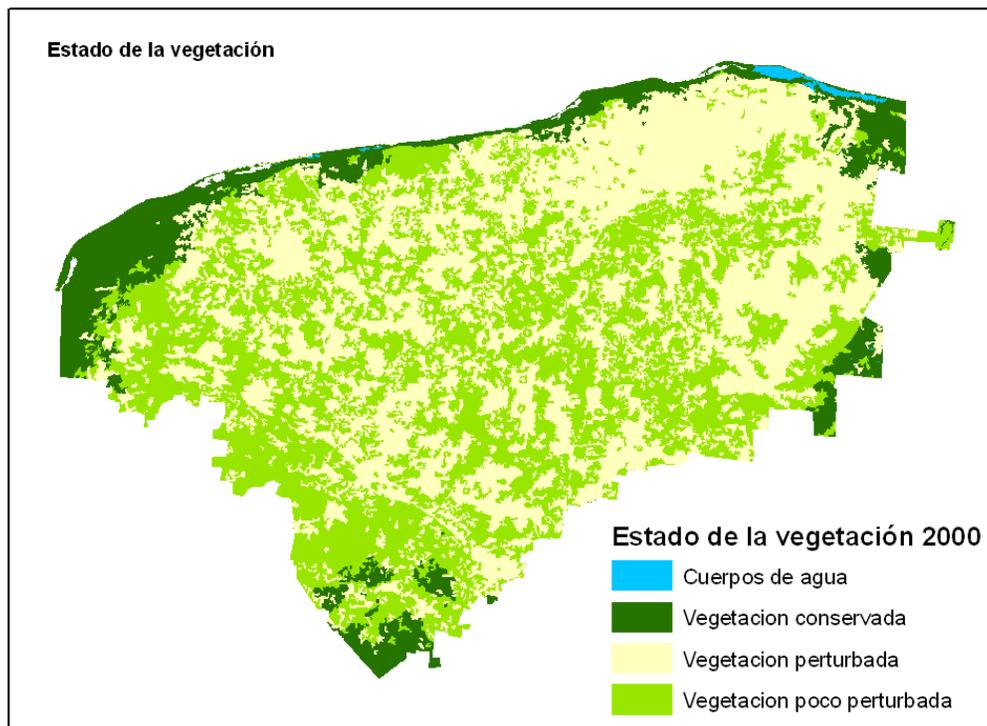
### 13. Mantenimiento de cobertura vegetal

La vegetación que circunda los cenotes proporciona refugio y alimento para diversos organismos y es la fuente principal de energía del sistema (Schmitter *et al.*, 2001). Esta vegetación requiere de una fuente segura de agua sobre todo en la temporada de secas, es común encontrar mayor cobertura vegetal alrededor de los cenotes así como fracturas con presencia de raíces en busca del agua subterránea. El mantenimiento de cobertura vegetal es un servicio de soporte clave, ya que mantiene el hidroperiodo<sup>2</sup> en el área (Brauman *et al.*, 2007). En la figura 15 se muestra un mapa del estado de la vegetación en el Estado de Yucatán, éste se encuentra unificado en casi su totalidad y clasificado principalmente en áreas con vegetación poco perturbadas. Esta perturbación se relaciona con el uso de suelo. La presencia de vegetación equilibra las trayectorias de flujo superficial canalizando el agua en surcos y zanjas o físicamente reduciendo la velocidad por tierra (Brauman *et al.*, 2007).

---

<sup>2</sup> El hidroperiodo son las fluctuaciones estacionales características de las estaciones secas y húmedas (Brauman *et al.*, 2007). Las condiciones impuestas por el hidroperiodo son muy importantes para el mantenimiento de la estructura y funcionamiento de la selva y el acuífero ya que crean condiciones físicas y químicas que impactan en la anaerobiosis del suelo, la acumulación de materia orgánica, la disponibilidad de nutrientes, la riqueza y composición de especies y la productividad primaria (Flores-Verdugo *et al.*, 2007).

Por otra parte, la madera es una materia prima con un valor comercial importante. Ésta es utilizada como material para la construcción de mobiliario, infraestructura o piezas de decoración y también sirve como combustible lo que vincula la cobertura vegetal con un servicio ecosistémico de provisión de la selva.



**Figura 15. Mapa de vegetación del Estado de Yucatán (SEDUMA, 2015).**

En la Tabla 6 se muestra un recapitulativo de los 13 servicios ecosistémicos identificados en la zona de estudio, para mejor comprensión de lo expuesto en los apartados anteriores.

**Tabla 6. Descripción y clasificación general de los servicios ecosistémicos brindados por el acuífero de la Zona de Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes**

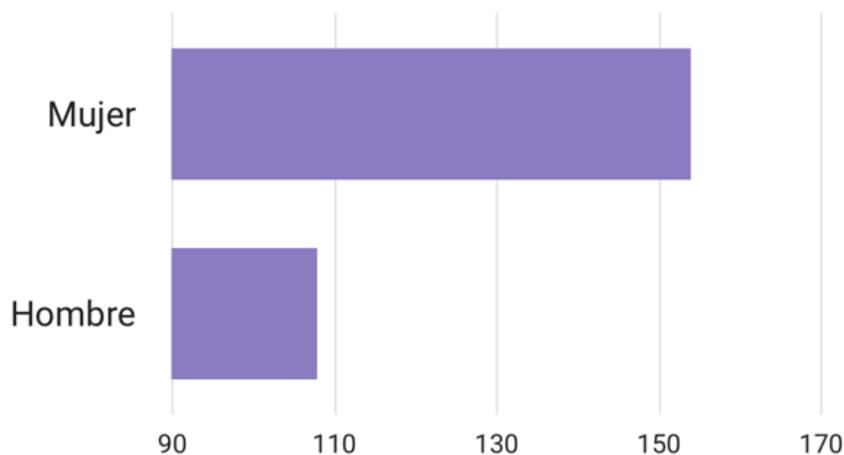
	<b>SE del acuífero</b>	<b>Procesos y funciones</b>
Culturales	Turismo y recreación	Paisajes únicos y estéticos actividades de recreación, naturaleza y aventura. (espeleobuceo, snorkel, nado, rapel, tirolesa, kayak, senderismo, etc.)
	Educación ambiental	Conciencia sobre la interacción hombre-naturaleza. Habitantes y usuarios del sitio interesados con el cuidado y la preservación del acuífero.
	Investigación	Interés por el acuífero en su estado natural para conocer su dinamismo e interacciones. Generación de conocimiento sobre el acuífero
Provisión	Cosmovisión maya de los cenotes, grutas y cavernas	Las tradiciones y costumbres de la cultura maya relacionadas con el acuífero permitieron el desarrollo y prevalencia de la cultura, dándole un valor ceremonial y religioso, visualizarlo como un punto de encuentro y refugio y apropiación de términos en maya asociados especialmente al acuífero y utilización de herramientas ligadas al agua de los cenotes, aunque también utilizarlo como basurero.
	Agua para consumo humano	Uso del recurso como individuo y colectivamente para responder a necesidades básicas. En este servicio se considera el agua utilizada en procesos productivos con y sin fines de lucro.
	Agua para riego agrícola	Producción de pastos, maíz de grano, henequén, naranja, limón, aguacate, toronja, mandarina, sandía, frijol. Uso de técnicas de cultivo con diferentes demandas de agua (sistema tradicional de cultivo, sistema de riego, invernaderos). Enriquecimiento de nutrientes al suelo debido al uso de fertilizantes.
Regulación	Agua para uso pecuario	Criadero de aves-pollos y pavos; ganado: bovino, porcino y ovino; y la elaboración de la miel. Delimitación de zonas de pastoreo y otras fuentes de alimento que modifican el uso de suelo. Tipos de acceso al recurso hídrico y tratamiento. Presencia de materia orgánica.
	Conducto y/o transportación de agua	Capacidad de drenaje por la presencia de fracturas y fallas que facilitan el traslado del recurso en diferentes velocidades y volúmenes característicos de un sistema kárstico. Energía de flujo. Infraestructura natural para la distribución del recurso hídrico en el acuífero. Uso de cenotes, cuevas, grutas, cavernas y pozos como puntos de distribución.
	Barrera contra la intrusión salina	Formación de una barrera de agua dulce que impide la penetración de agua de mar.
Sustento	Depuración de masas de agua	Capacidad para filtrar y descomponer los residuos o cargas orgánicas. Formación de haloclina. Trampa de sedimentos formando arena o suelos
	Recarga y/o captación de agua de lluvia	Recolección del agua de lluvia. Proceso de infiltración sujeto a procesos biogeoquímicos. Permeabilidad y porosidad heterogénea. Espacio disponible para albergar suficientes cantidades de agua subterránea.
	Mantenimiento de cobertura vegetal	Control de inundaciones según temporalidad y disminuye la magnitud de escorrientas superficiales. Contribuyen con los procesos de evapotranspiración. Uso de la madera como materia prima
Preservación de Biodiversidad	Hábitat para comunidades de diversas especies que permiten la presencia de procesos biogeoquímicos. Influencia sobre la diversidad cultural, presencia de valores espirituales y religiosos de los ecosistemas y sus componentes.	

### **Análisis del tamaño de muestra y de la información obtenida en la encuesta**

La población objetivo quedó constituida por un total de 892,363 habitantes de la ciudad de Mérida (INEGI, 2015). La muestra se aseguró la representatividad de las variables socioeconómicas tales como edad, sexo y nivel de estudios, el tamaño de muestra calculado fue de 270 encuestas con un margen de error del 6%, con un nivel de confianza de 90%. Las características generales de los 262 encuestados (Apartado 1), se muestran en las figuras 16, 17 y 18. Las información sobre el cuidado del acuífero y los servicios ecosistémicos que este provee se presentan en las figuras 19, 20 y 21. El resto de la información obtenida en la encuesta se presentará en el capítulo IV sobre la valoración económica. Finalmente, del tamaño de muestra calculado se aplicaron 262 encuestas. Dada la naturaleza dicotómica de la variable disposición a pagar (sí/no) y que la población objetivo tiende a infinito, el error de la muestra se sitúa en 5 % para un nivel de confianza del 90% (Weisberg, 2005).

#### *Apartado 1: Características generales de los encuestados*

El 95% de los encuestados radica en el Estado de Yucatán principalmente en la ciudad de Mérida de los cuales 154 son mujeres y 108 hombres (Figura 16).



**Figura 16. Distribución del género de los encuestados.**

En relación a la escolaridad, alrededor del 50% de los encuestados son estudiantes (agroecología, cirujano dentista, comunicación, medicina, diseño de moda, veterinaria y

zootecnia, psicología), seguida por ingenieros (agrónomo, civil, ambiental, negocios y gestión empresarial, industrial, biomédico, mecatrónica, biotecnólogo, químico industrial, energía y petróleo), y docentes e investigadores. Otras profesiones que destacan son las de comunicólogo, nutriólogo, amas de casa y administradores. Casi la mitad de los encuestados (46%) cuenta con la preparatoria terminada (Figura 17).

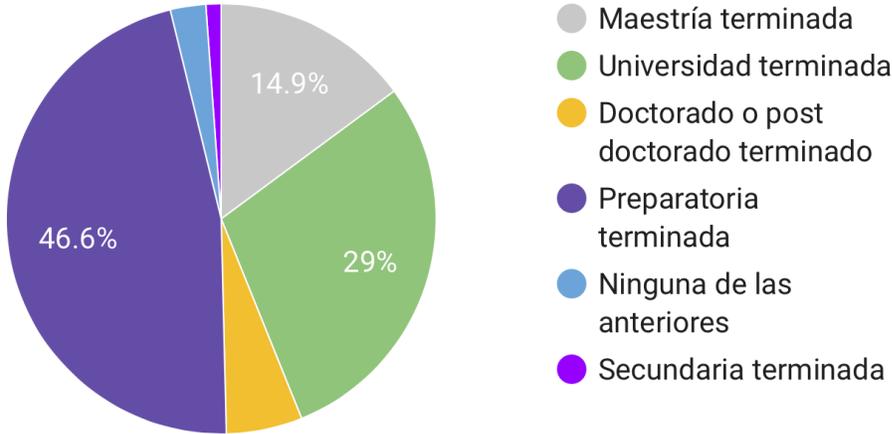


Figura 17. Escolaridad de los encuestados.

Sobre los datos relacionados al ingreso familiar de los encuestados, el 57% gana menos de \$16,000 pesos y el 10.7% de los encuestados no tiene ingresos (Figura 18), dato que se asocia con estudiantes que viven solos.

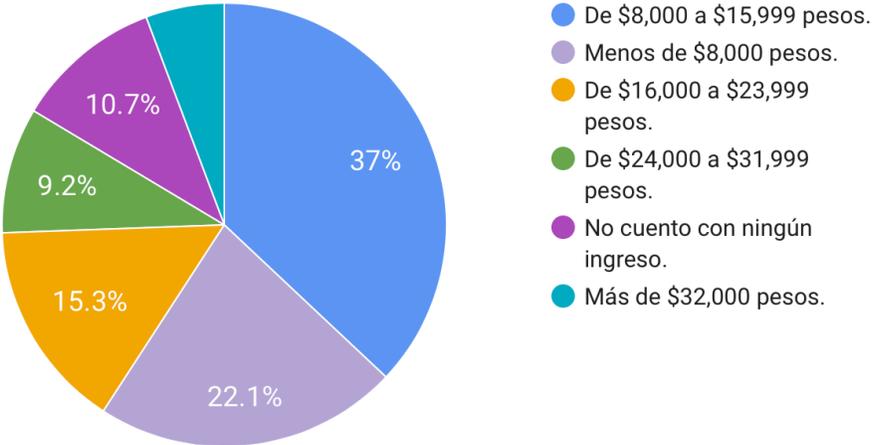
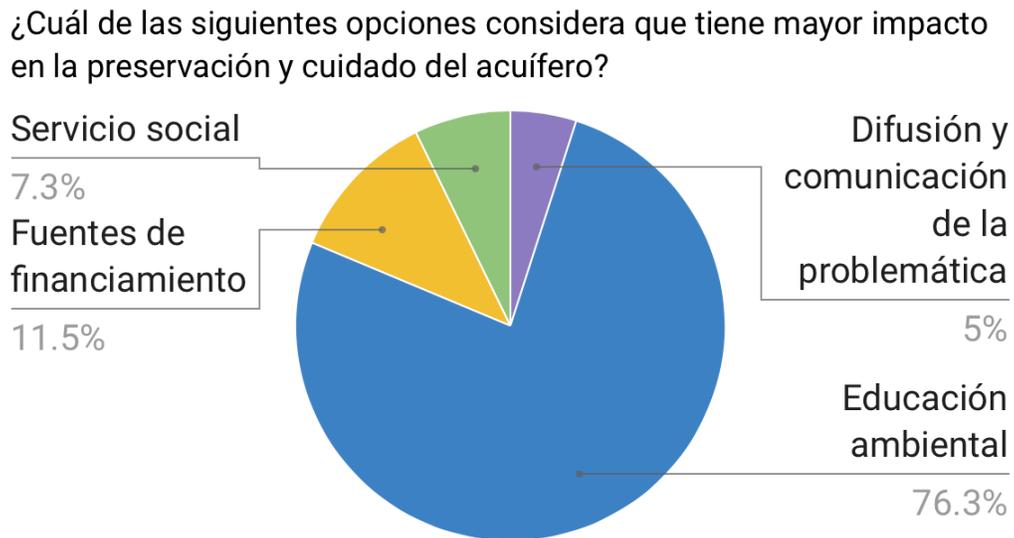


Figura 18. Ingreso familiar aproximado de los encuestados.

*Apartado 2: Conocimiento general del acuífero (gustos y preferencias) y zona de estudio*

Solo 9 de los 262 encuestados reporta NO haber visitado un cenote y 254 encuestados considera que los cenotes, cuevas o cavernas SI proporcionan bienes y servicios para la población. El 76% de los encuestados considera que la Educación Ambiental tiene un impacto importante en la preservación y cuidado del acuífero (Figura 19). Entendiendo la Educación Ambiental como el cambio de actitudes en las actividades diarias como individuo a través de la concientización. Sin embargo, al preguntar posteriormente en la encuesta sobre los servicios ecosistémicos más importantes que proporciona el acuífero, solo el 4.6% de la población considera la Educación Ambiental como la más importante (Figura 20).



**Figura 19. Acciones con mayor impacto en la preservación y cuidado del acuífero según los encuestados.**

*Funcionarios públicos de la ZRGHAC encuestados*

Un aspecto importante de la encuesta era contar con el punto de vista de los tomadores de decisiones de la zona de reserva, se logró que participaran en este ejercicio tres alcaldes de los municipios de Hochtún, Huhí y Cuzamá. Todos son hombres que perciben más \$24 mil pesos mensuales, han visitado algún cenote y consideran que éstos proporcionan servicios ecosistémicos, e identifican el decreto de la ZRGHAC. Sin

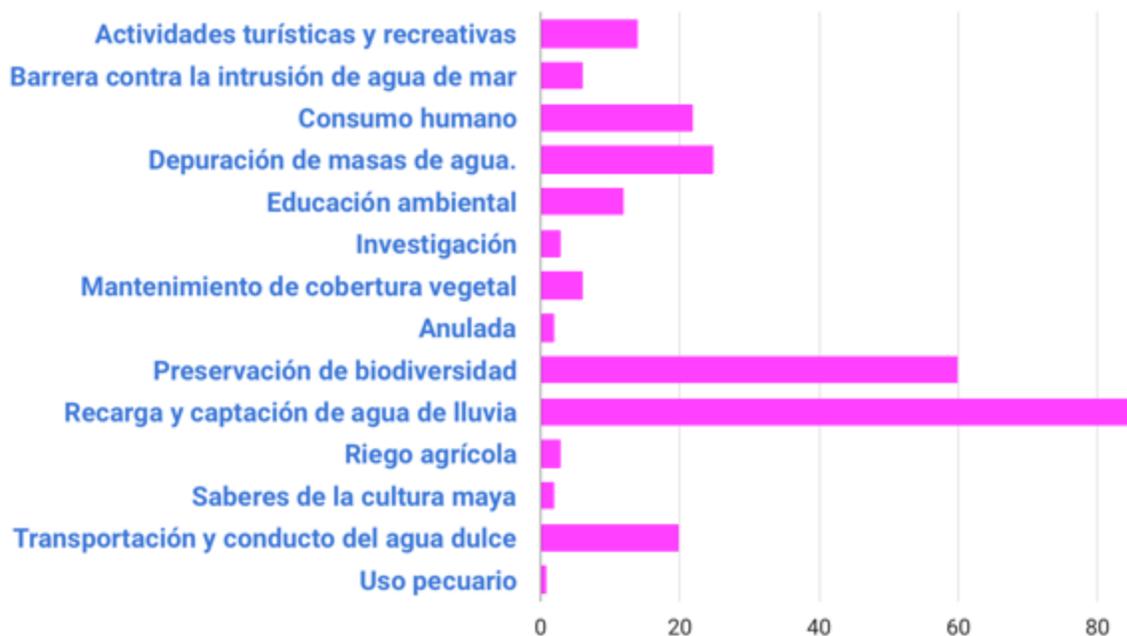
embargo, 2 de 3 de estos alcaldes consideran que las personas que se ven beneficiadas por estos servicios NO deben pagar una cuota para que la zona de reserva se mantenga limpia los próximos 10 años. Los tres Presidentes Municipales identificaron 10 de los 13 servicios ecosistémicos, omitiendo la Cosmogonía Maya de cenotes, cuevas y cavernas, la barrera contra la intrusión salina y la depuración de masas de agua. La mitad de los encuestados reporta que *SI* identifica la Zona de Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes decretada en 2013. Después de presentar a través de imágenes la ubicación geográfica de la ZRGHAC con una breve descripción y considerando que la mayoría de los encuestados conoce los cenotes, cuevas o cavernas se les preguntó ¿Cuáles bienes o servicios considera que los cenotes, cuevas o cavernas de esta reserva les brinda a los seres humanos? Con la opción a seleccionar más de una opción (Figura 20).



**Figura 20. Bienes o servicios que proporciona los cenotes, cuevas o cavernas identificados por los encuestados.**

La recarga y captación de agua de lluvia fue la más popular, aunque también se asocia con el nombre de la reserva por lo que podría generar cierta tendencia en los resultados. Sin embargo, la opción todas las anteriores fue la opción menos seleccionada a pesar que de acuerdo a este trabajo el acuífero si brinda todos estos servicios. Una quinta parte de los encuestados identifica de manera integral los servicios ecosistémicos del acuífero de la ZRGHAC, mientras que el resto identifica los servicios según sus necesidades o

experiencias considerando que la mayoría de los encuestados son habitantes de zonas urbanas.



**Figura 21. Servicios ecosistémicos más importantes del acuífero de la ZRGHAC, identificados por los encuestados**

Los encuestados indican que el servicio ecosistémico más importante es la recarga y captación de agua de lluvia (32.8%), la preservación de biodiversidad ocupa el segundo lugar (22.9%) (Figura 21). Los operadores turísticos entrevistados identificaron dentro la lista de opciones que se les proporcionó los siguientes servicios ecosistémicos brindados por cenotes, cuevas o cavernas: a) Recarga y captación de agua de lluvia, b) Depuración de masas de agua (Se refiere a los procesos naturales de auto-limpieza del acuífero), c) Mantenimiento de la vegetación, d) Presencia de biodiversidad, e) Actividades turísticas y recreativas, f) Educación ambiental, g) Investigación, h) Saberes de la cultura maya, i) Agua para consumo humano (para beber, higiene personal y otras necesidades básicas), j) Consumo humano.

### **Variables socioeconómicas y servicios ecosistémicos**

También se analizaron algunas variables independientes a través de Chi cuadrada para identificar relaciones entre algunas variables socio-económicas y los servicios

ecosistémicos. Para el análisis se realizaron subgrupos para cuatro variables: edad, escolaridad, género y lugar de residencia. En la variable edad se consideraron dos grupos:

*Grupo 1.* Los millennial y la generación z que son personas críticas, las cuales hacen uso cotidiano de la tecnología y son multitarea. Se caracterizan por ser emprendedores, valoran la participación y la colaboración, prefieren compartir a poseer promoviendo nuevos valores como la sostenibilidad, transparencia y el compromiso social. Este grupo abarca las edades de 18- 33 años de los encuestados.

*Grupo 2.* La generación x y los baby-boomers quienes crecieron en una etapa de prosperidad, con un buen nivel educativo, con una actitud consumista que contribuyó a fortalecer la economía mundial, poco preocupados por los impactos ambientales generados por la industria. Este grupo se compone de las edades de 34 a 72 años.

Para la escolaridad se estableció la siguiente clasificación:

*Grupo 1.* Preparatoria terminada a excepción de 3 que sólo terminaron la secundaria.

*Grupo 2.* Universidad terminada.

*Grupo 3.* Maestría o doctorado terminado.

En la variable de género las dos opciones utilizadas fueron hombre o mujer.

En la variable sobre lugar de residencia se realizaron se agrupó de la siguiente manera:

*Grupo 1.* Representa a las personas que radican dentro de la ZRGHAC

*Grupo 2.* Representa a las personas que viven en Mérida.

*Grupo 3.* Representa a las personas que radican en cualquier otro municipio que no forme parte de la ZRGHAC o que viva en la ciudad de Mérida.

La tabla 7 muestra los resultados del análisis estadístico realizado (Chi cuadrada) con el objetivo de responder a las hipótesis siguientes:

- HA existe una relación entre la identificación del SE de Recarga y Captación de agua de lluvia y la edad.
- HA Existe una relación entre la identificación de todos los SE y la edad.
- HA Existe una relación entre la identificación de la Recarga y captación de agua de lluvia como SE más importante y la edad.
- HA La escolaridad y la identificación del SE de Recarga y captación de agua de lluvia están relacionados.

- HA La escolaridad y la identificación de la recarga como el SE más importante están relacionados.
- HA El género y la identificación de todos los SE están relacionados.

En la tabla 7 se muestra en las celdas marcadas en gris los p valores de las relaciones que son significativas. La identificación del SE de Recarga y captación de agua de lluvia tiene una relación significativa con la edad y la escolaridad de los encuestados; así que es recomendable que estas dos variables socio-económicas sean consideradas en el análisis del valor económico (Capítulo IV) y en futuros estudios sobre los servicios ecosistémicos del acuífero. También se obtuvo una relación significativa entre la identificación de los 13 servicios que brinda el acuífero con el género y la edad. La identificación de los 13 SE brindados por el acuífero es importante ya que la percepción del valor del acuífero es integral aún cuando los hombres y mujeres no se benefician de manera directa con cada servicio.

**Tabla 6. Relación entre los servicios ecosistémicos brindados por el acuífero de la Zona de Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes y las variables socio-económicas mediante Chi Cuadrada ( $\alpha=0.05$ ) (NS= no existe significancia)**

Descripción	Variables socio- económicas p valor			
	Edad	Escolaridad	Género	Lugar donde radica actualmente
<i>Preguntas (si o no)</i>				
Número de encuestados	262	255	262	262
Visita a cenotes	NS	0.75	0.62	NS
Identificación de la Recarga como SE	0.007	p<0.05	0.32	0.51
Identificación de todos los SE mencionados	0.04	0.74	0.002	NS
Identificación del SE de Recarga como el más importante	p<0.05	p<0.05	0.08	0.75

## Discusión

Es necesario identificar la diversidad de beneficios que nos brinda el acuífero para nuestro bienestar común, el concepto de servicios ecosistémicos facilita el entendimiento de las funciones y procesos de los ecosistemas y la relación con el bienestar humano. En relación a la encuesta aplicada, de manera general los encuestados identifican con claridad que los cenotes brindan diversos servicios o beneficios a la seres humanos, destacando que para el caso del acuífero de la zona de estudio: 1) la recarga y captación de agua de lluvia así como la 2) preservación de la biodiversidad fueron los dos servicios ecosistémicos más reconocidos por los entrevistados.

De los 13 servicios identificados, los servicios culturales son los más complejos en cuanto a métrica ya que los beneficios que representan son en esencia cualitativos. Se identificaron los servicios de educación ambiental, de investigación y de cosmovisión maya que no se acota exclusivamente a usos espirituales sino a valores humanos, lo cual coincide con lo expuesto por Barbier *et al.* (2011). Para Brauman *et al.* (2007), los servicios culturales hidrológicos incluyen usos espirituales, apreciación escénica y turismo. Bergkamp y Cross (2006) identifican los usos del agua subterránea como servicios de provisión, entre ellos el uso doméstico, el uso para actividades industriales, el agua para beber y el uso para la agricultura. En este trabajo el servicio ecosistémico de agua para consumo humano abarca el uso doméstico, industrial y para beber. Sin embargo, es importante señalar que la práctica de beber el agua directamente de los cenotes del acuífero es cada vez más escasa (COTASMEY, 2015) y se ha reemplazado por el agua embotellada.

El agua para uso pecuario no fue considerado por Bergkamp y Cross (2006). Sin embargo, Batllori-Sampedro (2015) lo identifica como forrajeros, refiriéndose al cultivo de pastos que son fuente de alimento para el ganado. Adicional a la actividad asociada al cultivo de pastos como alimento, también existen abrevaderos ubicados comúnmente a lado de los cenotes y en la zona asignada para la crianza de los animales donde también se encuentran bombas o pozos de extracción y áreas de sombra para el descanso donde los usuarios se benefician de agua para su ganado. Es importante considerar que la actividad ganadera que se realiza en la ZRGHAC es principalmente de auto consumo aunque ya existen zonas que han cambiado su uso de suelo a zonas enfocadas a la ganadería. El agua utilizada para riego agrícola y para la ganadería se encuentran ligadas

debido a que los pastos ocupan el primer lugar en cultivos de la zona, ambos usos son considerados servicios de provisión. Éstos pueden ocasionar un cambio de uso de suelo derivado de ciertas actividades económicas o la urbanización, un deterioro en la calidad del agua debido al uso excesivo de fertilizantes o por la presencia de contaminantes sin ninguna regulación, la modificación de la vegetación al establecer monocultivos o introducir nuevas especies; sin embargo también proporcionan un beneficio económico según la actividad y la demanda del servicio.

En los servicios de regulación los identificados en este trabajo son semejantes a lo propuesto por Batllori-Sampedro (2015). La relevancia de los servicios de regulación es su aporte al ciclo de nutrientes y del agua que permiten la filtración y descomposición de los residuos o cargas orgánicas, aunque es importante mencionar las amenazas al acuífero por otros contaminantes como pesticidas, metales pesados, entre otros (Escolero, 2000; Torres-Díaz *et al.*, 2014).

Retomando el papel del agua subterránea en el ciclo del agua, se identifica el servicio de recarga y captación de agua de lluvia como el más importante. Sin embargo, es necesario mencionar que el servicio de descarga no es mencionado como servicio ecosistémico de sustento para efectos de este trabajo, debido a las características particulares del área geográfica que favorece la infiltración y no el afloramiento de aguas subterráneas; común en otras zonas geográficas cercanas a la costa, como lo destaca Batllori-Sampedro (2015). Bergkamp y Cross (2006) consideran al agua dulce subterránea como un servicio de sustento por el simple hecho que permite que la vida exista, además de jugar un papel en el ciclo de agua y de nutrientes.

La interacción entre ecosistemas terrestres y acuáticos es escasamente estudiada (Balvanera *et al.*, 2016), y no se conocen estudios que relacionen a la biodiversidad con los servicios ecosistémicos acuáticos como son los cenotes. Existe una interdependencia del acuífero con otros ecosistemas como las selvas, las aguadas, los cenotes o el manglar ya que éstos son el hábitat de algunas especies endémicas de aves, mamíferos, reptiles, murciélagos y peces así como de flora y otros organismos que conforman la biodiversidad del sitio. Estas especies pueden encontrarse tanto en la parte subterránea como en la superficie. Al mismo tiempo estos servicios ecosistémicos muestran la relación directa o indirecta que existe entre el ser humano y el acuífero (Daily, 1997). El cambio de

uso de suelo causa degradación y fragmentación de los ecosistemas porque genera una pérdida de hábitat para las especies produciendo incluso la extinción y un impacto negativo en los ciclos hidrológicos y biogeoquímicos (Arriaga, 2009; Maass, 2016) este impacto se ve reflejado en la degradación de varios servicios ecosistémicos de regulación y sustento del acuífero mientras que los de provisión se ven generalmente beneficiados.

Se obtuvo un tamaño de muestra para la aplicación de la encuesta de 270, estos resultados son similares a los reportados por Perni y Martínez-Paz (2012), en cuanto al tamaño de la muestra y el margen de error (<5%). Weisberg (2005), indican una precisión deseada de  $\pm 5\%$ , con un nivel de confianza (95%) es adecuada. Christop *et al.* (2014) indican que concluyen que la edad, la escolaridad y el ingreso económico influye significativamente en la participación en programas de pago por servicios ambientales. Aunque aun son pocos los estudios sobre los SE del acuífero podemos concluir que las variables de escolaridad y edad son relevantes para la identificación de los servicios ecosistémicos y para la diferenciación de la población que reconoce su valor.

Debido a que se aplicaron encuestas a personas con diferentes edades y profesiones enfocándose en habitantes de la ciudad de Mérida, se puede detectar que las actividades propias de zonas rurales como lo son agua para riego agrícola y para uso pecuario son identificadas por los encuestados que habitan en la ZRGHAC. Sin embargo, los resultados de la encuesta muestran cómo de acuerdo a las necesidades, intereses y conocimiento de cada participante logran identificar los servicios ecosistémicos. Los resultados de la encuesta reflejan una necesidad del cuidado del acuífero para su preservación por parte de diversos grupos sociales: estudiantes, profesionistas, funcionarios, académicos, sociedad civil. Es necesario reconocer como sociedad la importancia de la ZRGHAC y tomar acciones que promuevan el resguardo y preservación de la misma. A pesar de que el concepto de servicios ecosistémicos es relativamente nuevo y poco estudiado en diversos ecosistemas acuáticos, las encuestas revelaron que si se reconoce el bienestar humano que proporcionan los servicios ecosistémicos del acuífero. De acuerdo con Bergkamp y Cross (2006) existe una estrecha interdependencia entre los servicios ecosistémicos y el agua subterránea. Los servicios ecosistémicos identificados concuerdan con lo expuesto por Batllori-Sampedro (2015), cuya descripción se hace a nivel estatal, coincidiendo con los servicios identificados en este trabajo.

## **CAPÍTULO III. Evaluación de la calidad del agua y su relación con los servicios ecosistémicos**

### **Introducción**

En el Capítulo II se identificaron 13 servicios brindados por el acuífero de la ZRGHAC. La calidad de estos servicios de manera directa o indirecta dependen de las condiciones y características del agua subterránea. La importancia de la calidad del agua no sólo abarca las fuentes de abastecimiento sino también es un atributo importante en servicios hidrológicos como los servicios culturales, de recreación, de soporte y provisión (Brauman *et al.*, 2007) por esta razón es un indicador capaz de regular los servicios ecosistémicos que provee el acuífero.

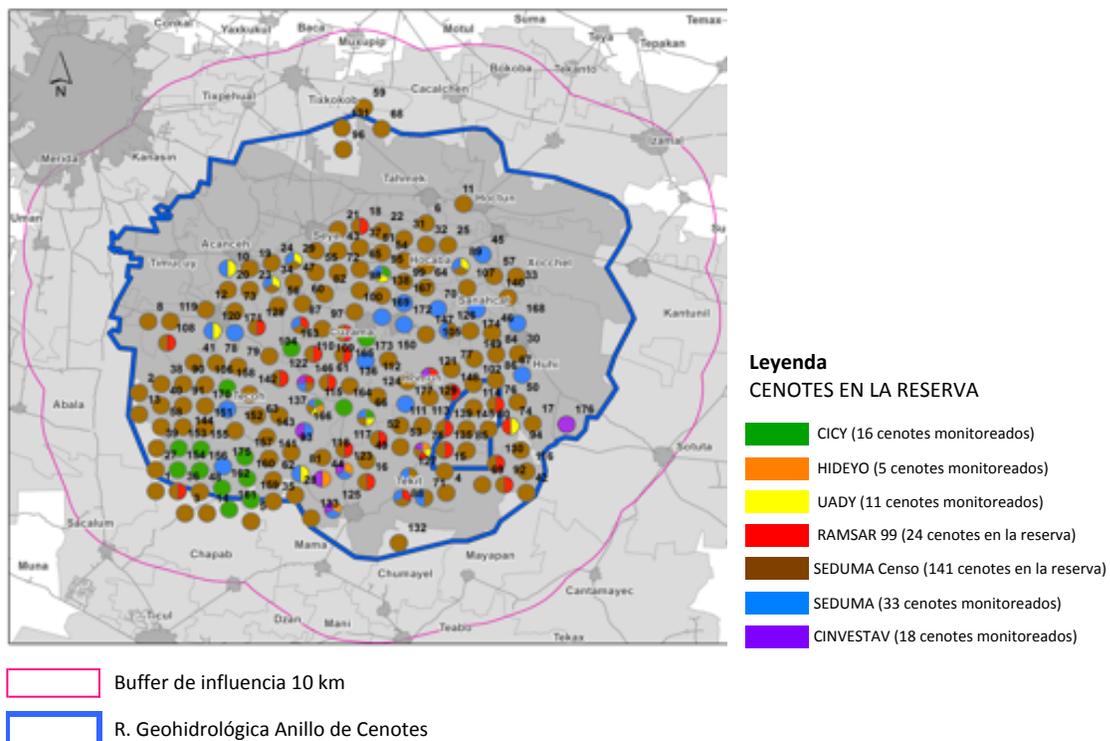
El 28 de julio de 2010, a través de la Resolución 64/292, la Asamblea General de las Naciones Unidas reconoció explícitamente el derecho humano al agua y al saneamiento, reafirmando que un agua potable limpia y el saneamiento son esenciales para la realización de todos los derechos humanos (ONU, 2005). Sobre los términos que se consideran para este derecho están el abastecimiento de agua por persona debe ser suficiente y continuo para el uso personal y doméstico. Estos usos incluyen de forma general el agua de beber, el saneamiento personal, lavado de ropa, la preparación de alimentos, la limpieza del hogar y la higiene personal. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud son necesarios entre 50 y 100 litros de agua por persona al día para garantizar que se cubren las necesidades más básicas (WHO, 2003). El agua necesaria para el uso personal y doméstico, debe ser saludable; es decir, libre de microorganismos, sustancias químicas y peligros radiológicos que constituyan una amenaza para la salud humana.

México cuenta con normas, criterios y reglamentos para preservar y garantizar la calidad del agua, en concordancia con normativas internacionales como la establecida por la Organización Mundial de la Salud. Por ejemplo, la Norma Oficial Mexicana “*NOM-127-SSA1-1994 de Salud ambiental, agua para uso y consumo humano- Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*”, es de carácter obligatorio, y define los límites máximos permisibles de las características químicas, radioactivas, bacteriológicas, físicas y organolépticas así como los tratamientos necesarios para la potabilización del recurso, independientemente del cuerpo de agua del

que provenga. De igual forma están los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89, utilizados para calificar a los cuerpos de agua como aptos para ser utilizados como fuente de abastecimiento de agua potable, en actividades recreativas con contacto primario, para riego agrícola, para uso pecuario, en la acuicultura, o para la protección de la vida acuática (DOF, 1989).

Los cenotes en su mayoría son utilizados en diversas actividades y por diversos actores que le asignan una valoración y una demanda distinta (Yahdjian *et al.*, 2015). Los cenotes hasta ahora monitoreados por diferentes instituciones educativas y de gobierno en la ZRGHAC son 177 (SEDUMA, 2015) (Figura 22). De los cuales, 26 cenotes o grutas son reconocidos como atractivos turísticos dentro de la zona de reserva ya sea porque se encuentran promocionados en internet, folletería o se constataron de manera presencial.

En este capítulo se analiza la calidad del agua de once cenotes ubicados en la ZRGHAC. Ésta se determina en base al cumplimiento de normas y reglamentos de carácter nacional e internacional con el objetivo de evitar poner en riesgo la salud humana (WHO, 2007).



**Figura 22. Cenotes monitoreados o censados en la ZRGHAC (SEDUMA, 2015).**

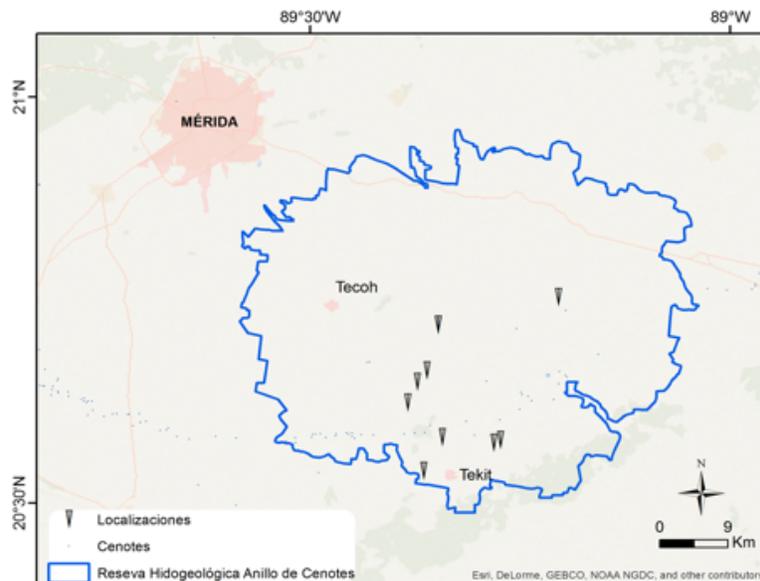
Las condiciones actuales de la calidad del agua que albergan los cenotes particularmente en la ZRGHAC ha sido monitoreada de manera aislada por algunas instituciones, y no existe un programa de monitoreo periódicos. La calidad y cantidad disponible de agua subterránea están relacionadas con la oferta disponible y la demanda relativa de los servicios ecosistémicos que proporciona el acuífero (Yahdjian *et al.*, 2015).

En este capítulo a través de la construcción de dos semáforos se busco realizar un comparativo entre cenotes de acuerdo con su porcentaje de cumplimiento con la normativa vigente con un primer semáforo y relacionar la calidad del agua de los cenotes con los servicios ecosistémicos con un segundo semáforo.

## Metodología

### Campañas de muestreo y selección de sitios

Se seleccionaron 11 cenotes localizados en la zona de reserva: Calcuch, Noh Mozón, Tanimax, Teabo, Utzil, Subinché, Bekal, Chelentún, Santa Cruz, Dzapacal, y Bebelchén (Figura 23).



**Figura 23. Ubicación de los 11 cenotes muestreados.**

Actualmente, siete cenotes tienen como actividad principal el uso turístico y recreativo; y cuatro cenotes son utilizados para riego, uso pecuario o uso recreativo. La selección de

los sitios además de basarse en las actividades productivas realizadas, también consideró la densidad de población de los municipios, el que se encontraran en la zona de recarga, los estudios previos realizados por diversas instituciones en los sitios, y a la accesibilidad a los mismos. Se llevaron a cabo 2 salidas de campo a la zona de estudio para la colecta de muestras de agua y la medición de parámetros *in situ*.

Para la evaluación de la calidad del agua, se seleccionaron los siguientes parámetros: bacteriología (coliformes totales y fecales), nutrientes (nitratos, nitritos, fosfatos, amonio), sulfatos, cloruros, alcalinidad. Las muestras de agua se colectaron en superficie con una botella horizontal tipo Van Dorn. Se colectó un volumen de 125 ml para las muestras de nutrientes y se filtraron con un poro de 0.45µm marca Millipore para su preservación. Para la determinación de alcalinidad se colectaron 250 ml de agua sin filtración previa y sin burbuja de aire. Se utilizaron botellas Nalgene® de polietileno de alta densidad para su almacenamiento. Las muestras fueron conservadas a una temperatura de -4°C y almacenadas en hieleras hasta su llegada al laboratorio para su análisis.

Para la determinación de coliformes totales y fecales se colectaron 100 ml de agua en una botella estéril con tiosulfato de sodio como inhibidor. Debido a la naturaleza de esta muestra, el análisis se llevó a cabo el mismo día de la colecta. Las visitas a campo se realizaron durante el mes de mayo 2015 y mayo 2016. Algunos de los datos obtenidos con la sonda CTD Castaway también fueron útiles para los resultados del capítulo 2 observados en las figuras 13 y 14.

En la Tabla 8 se enlistan los cenotes muestreados con su profundidad aproximada y el tipo de cenote. Cabe resaltar que algunos de los sitios seleccionados también forman parte del sitio Ramsar “Anillo de Cenotes” (RAMSAR, 2010).

**Tabla 7. Características de los 11 cenotes seleccionados en la zona de estudio**

Localidad	Nombre de cenote y tipo	Prof.	Uso	Longitud	Latitud
Sabacché, Tecoh	Kalcuch (II)	15m	Turístico	-89.3610°	20.6628°
Pixyah, Tecoh	Noh Mozon (I)	15m	Turístico	-89.3841°	20.6233°
Sabacché, Tecoh	Tanimax (II)	30m	Turístico	-89.3725°	20.6488°
Tekit	Teabo (Xpacay) (I)	20m	Riego, uso pecuario	-89.3650°	20.5391°
Tekit	Utzil (III)	40m	Recreativo	-89.3428°	20.5808°
Tekit	Subinché (II)	5m	Recreativo	-89.2814°	20.5738°
Tekit	Bekal (III)	<5 m	Uso Pecuario y recreativo	-89.2735°	20.5771°
Chunkanán, Cuzamá	Chelentún (II)	15m	Turístico	-89.3476°	20.7195°
Chunkanán, Cuzamá	Santa Cruz (II)	<5 m	Turístico	-89.3476°	20.7195°
Chunkanán, Cuzamá	Dzapacal (III)	5m	Turístico	-89.3476°	20.7195°
Sanahcat	Bebelchén(III)	15m	Turístico	-89.2045°	20.7534°

I Cenote abierto. II Cenote semicerrado. III Cenote cerrado

### **Análisis *in situ***

Para la medición de parámetros *in situ* se utilizó una sonda multiparamétrica (YSI® serie 6600) con una precisión de:  $\pm 0.1$ mg/L para oxígeno disuelto,  $\pm 0.001$ mS/cm para CE,  $\pm 0.15$ °C para temperatura,  $\pm 1\%$  para salinidad y  $\pm 0.2$  unidades para pH. Adicionalmente se realizaron perfiles de CE, temperatura y salinidad con una sonda CTD Castaway con los siguientes valores de precisión:  $\pm 5$  $\mu$ S/cm para CE,  $\pm 0.1$  para salinidad y  $\pm 0.005$ °C para temperatura.

## **Análisis en laboratorio**

### *Análisis bacteriológico: Coliformes totales y fecales (*Escherichia coli*)*

Se utilizó el método del sustrato cromogénico definido de la empresa IDEXX, utilizando el reactivo denominado Colisure como medio de cultivo. Cada muestra fue sellada por calor (charola Quanti-Tray 2000) e incubada por 24h a una temperatura de 37°C. Las muestras fueron analizadas después de este tiempo para la obtención del NMP/100mL de cada muestra. La prueba de Colisure, desarrollada por la corporación IDEXX (APHA, 2012)

### *Análisis por cromatografía iónica*

Se analizaron por cromatografía iónica nitritos, nitratos, fosfatos, cloruros y sulfatos. Se utilizó un cromatógrafo de iones con detector de conductividad (882 Compact IC Plus) de la marca Metrohm.

### *Análisis por espectrofotometría UV-VIS*

Por la técnica de espectrofotometría UV-Vis se determinó la concentración de amonio. Se utilizó el espectrofotómetro modelo Smart2 de la Marca LaMotte® siguiendo el método 3649-SC (Método de Nesslerización).

### *Análisis por titulación*

La alcalinidad fue cuantificada por medio de una titulación ácido-base (Método 8203 HACH) con un titulador automático modelo 16900 marca HACH. La concentración del ácido sulfúrico utilizado fue de 1.6N y como indicadores visuales se utilizaron fenolftaleína y verde de bromocresol. También como indicador se utilizó un potenciómetro con electrodo de pH (Fisher-Scientific model XL60).

## **Semáforo de calidad del agua de acuerdo al uso**

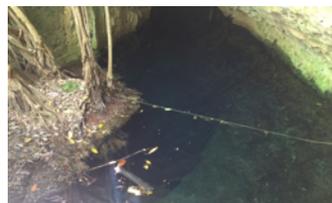
Se desarrolló un semáforo de calidad de agua considerando el cumplimiento de los resultados obtenidos en los dos muestreos con los límites máximos permisibles de acuerdo a normativa nacional e internacional. Se consideraron: 1) los criterios ecológicos establecidos para uso recreativo con contacto primario, para riego agrícola, para uso pecuario y para la protección de vida acuática en agua dulce (CE-CCA-001/89), 2) la Norma Oficial Mexicana "NOM-127-SSA1-1994, y 3) los estándares de la Organización Mundial de Salud para agua para consumo humano.

En la Tabla 9 se presenta un ejemplo con la tabla de integración de la información para la construcción del semáforo de calidad de agua de uno de los once cenotes muestreados, en este caso para el cenote Tanimax. Cada recuadro se marcó con rojo si no cumple y con verde si cumplió con límite permisible correspondiente. En los anexos se pueden consultar los resultados de los diez cenotes restantes que fueron estudiados. En algunos casos no existen límites permisibles para ciertos parámetros, se reflejan como recuadros en blanco.

<b>No cumple</b>
<b>Cumple</b>
<b>Muestreos: 2015 (1) y 2016 (2)</b>

**Tabla 8. Ficha elaborada por cenote (incluye resultados de los parámetros analizados para evaluar la calidad de agua de acuerdo con la normatividad y nivel de cumplimiento (ejemplo: Cenote Tanimax). (AUS= Ausencia)**

Tanimax	Resultados		Normativa de acuerdo al uso del agua para diferentes actividades													
	Muestreo		Agua Potable										Protección vida acuática (agua dulce)			
	1	2	N.O.M-127-SSA1(1994) modif 2000		O.M.S International Standards		Fuente Abastecimiento de Agua Potable		Recreativo c/contacto primario		Riego agrícola		Pecuario		Protección vida acuática (agua dulce)	
Sulfatos (mg/L)	18.40	12.58	400	400			500	500			130	130			0.005	0.005
Cloruros (mg/L)	100.90	42.17	250	250	250	250	250	250			147.5	147.5			250	250
Nitratos (mg/L)	19.93	17.09	10	10	50	50	5	5					90	90		
Nitritos (mg/L)	<LDM	<LDM	0.05	0.05	3-0.2	3-0.2	0.05	0.05					10	10		
Amonio (mg/L)	0.43	0.21	0.5	0.5											0.06	0.06
Fosfatos (mg/L)	<LDM	<LDM					0.1	0.1							0.025	0.025
Alcalinidad (mg/L)	480	482	500	500	500	500	400	400								
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	<1.0	<1.0	Aus	Aus	Aus	Aus	1000	1000	200	200	1000	1000			200	200
Coliformes totales (NMP/100ml)	1011	691.0	Aus	Aus	Aus	Aus										
Temperatura (°C)	26.5800	26.42					Condiciones naturales +2,5				Condiciones nat +1,6					
SDT	1325	660	1000	1000	1000	1000	1000	1000								
pH	6.98	7.26	6.5-8.5	6.5-8.5	6.5-8.5	6.5-8.6	5 y 9	5 y 9			4,5 y 9	4,5 y 9				
OD (mg/L)	3.39	4.35					4	4							5	5



La tabla 8 muestra la información de las condiciones del agua de acuerdo con las normas oficiales en relación al uso del agua. Los resultados de la muestra 1 corresponden a mayo de 2015 mientras que los de la muestra 2 son de mayo de 2016.

Posteriormente, y para realizar un comparativo entre cenotes, se estableció un semáforo con diferentes rangos asociados a un color, el color amarillo indica que cumple con los límites permisibles en un 50%; en color verde que cumple entre el 50% y 75% y en color azul indica que cumple más del 75% de los límites máximos permisibles establecidos por normativa nacional e internacional (Figura 24). Para el establecimiento de los rangos, todas las variables tienen el mismo peso. Los porcentajes fueron asignados para integrar todos los criterios dándoles un valor equilibrado y a la vez definir un límite inferior, en este caso fue el rango <50% (Regular). Cuando se tiene menos del 50% en el cumplimiento de los parámetros, se considera que puede poner en riesgo la salud humana y del ecosistema, por lo tanto es el límite más estricto.

Rangos	Calidad de Agua	
<50% de cumplimiento	Regular	La calidad del agua es regular y su consumo podría ocasionar efectos adversos a la salud
50% y 75% de cumplimiento	Buena	Buena calidad de agua, aunque se requiere tratamiento si se utilizará como fuente de abastecimiento humano
>75% de cumplimiento	Muy buena	Muy buena calidad de agua y puede ser utilizada como fuente de abastecimiento
Muestreos: 2015(1) y 2016 (2)		

Figura 24. Semáforo con rangos de cumplimiento con respecto a la calidad del agua

### Análisis estadístico

Se utilizó PRIMER v6 y R para realizar un análisis de similitud y un análisis de varianza de dos vías respectivamente; para contrastar los resultados obtenidos de calidad de agua de los diferentes muestreos y los usos identificados para los once cenotes estudiados de la ZRGHAC. Las características básicas de PRIMER (Plymouth Routines In Multivariate Ecological Research, [www.primer-e.com](http://www.primer-e.com)) cubren una serie de rutinas univariadas, gráficas y multivariadas: agrupación jerárquica en grupos de muestras (CLUSTER); ordenado por escala no-métrica multidimensional (MDS) y componentes principales (PCA) para resumir los patrones en la composición de las especies y las variables ambientales por ejemplo; prueba de hipótesis basada en la permutación (ANOSIM), un análogo de ANOVA univariado que prueba las diferencias entre grupos de muestras (multivariados)

de diferentes tiempos, localizaciones, tratamientos experimentales etc. (Clarke & Gorley, 2006),

### **Semáforo de calidad de agua en relación a los servicios ecosistémicos que brinda**

La finalidad de este semáforo es asociar la calidad del agua con los servicios ecosistémicos que provee el acuífero. Mediante el semáforo se puede realizar un comparativo visual sobre el nivel de observancia de los servicios ecosistémicos. Manteniendo una buena a muy buena calidad del agua se asegura la permanencia de los servicios ecosistémicos que brinda el acuífero en la zona de reserva. Para ello se realizó una semaforización que contempla el porcentaje de cumplimiento de los límites permisibles de acuerdo al servicio que proporciona, y se asociaron a tres colores: rojo, amarillo y verde como se muestra.

% de Cumplimiento
≤ 50
>50 - ≤75
>75-100

## **Resultados**

### **Semáforo de calidad de agua de acuerdo al cumplimiento de normatividad**

Con este semáforo se evalúan las condiciones de calidad de agua de acuerdo a los límites máximos establecidos en la normatividad para diferentes parámetros, en relación al uso asociado de los cenotes: como fuente de abastecimiento, para riego agrícola, uso recreativo, pecuario y los criterios ecológicos para la protección de la vida acuática, considerando que estos usos pueden ser simultáneos y varían según los usuarios y sus necesidades. El semáforo de calidad del agua como se mencionó en la metodología se estableció en base a un porcentaje de cumplimiento con la normatividad de parámetros fisicoquímicos, nutrientes y bacteriológicos, en azul un cumplimiento superior al 75%, en verde cumplimiento entre 50 y 75 % y en amarillo un cumplimiento inferior al 50% (Figura 24). De manera global, el nivel de cumplimiento de calidad del agua en los cenotes es superior al 75%. Los resultados obtenidos para cloruros, fosfatos, sulfatos, nitritos, coliformes fecales, temperatura y el pH reflejan muy buena calidad del agua (semáforo en azul) en todos los sitios muestreados, cumplen con la normatividad para los diferentes usos (Tabla 10).

En el caso de los resultados obtenidos para amonio y nitratos, ambos presentan un

comportamiento similar en el semáforo (verde), no presentan variaciones entre muestreos y entre cenotes. De acuerdo con el semáforo estos dos parámetros reflejan buena calidad de agua, aunque no recomendable como fuente de abastecimiento para consumo humano, requiere someterse a tratamiento de potabilización para que pueda ser utilizada. El oxígeno disuelto presentó un comportamiento más variable, influenciado por las características de los cenotes y la profundidad de los mismos, por ejemplo el cenote Santa Cruz, el semáforo para el oxígeno disuelto se mantiene en amarillo para ambos muestreos, posiblemente debido a que es un cenote somero y semicerrado. De los once cenotes, Kalcuch, Bebelchén y Tanimax presentan las mejores condiciones de calidad de agua (semáforo en azul), el cual está ligado al cumplimiento de la normatividad (Tabla 10).

La ausencia total de coliformes fecales (*Escherichia coli*), en el agua de las muestras analizadas la hace apta para diferentes usos, incluyendo el consumo como agua potable; evitando el riesgo a la salud para las personas que consumen el agua o visitan los sitios de manera recreativa. Utilizar organismos como *Escherichia coli* (*E. coli*) como indicadores de contaminación fecal se considera una práctica bien establecida y tradicionalmente utilizada para la evaluación de la calidad de agua potable. De acuerdo a la Organización Mundial de Salud estos organismos se consideran parámetros importantes de verificación y vigilancia (WHO, 2011). Por otro lado para la realización de actividades recreativas *E. coli* es el único indicador de referencia vigente en la normativa nacional CE-CCA-001/89 (DOF, 1989). Con respecto al pH no existen valores guía que indiquen un riesgo para la salud. Sin embargo, es considerado un parámetro importante y funcional del agua debido a la cantidad de procesos que dependen de él para su correcto funcionamiento (WHO, 2011). Por otra parte, es importante señalar que la presencia de coliformes totales puede tener como origen de las actividades propias en la zona como desechos animales, por lo que se hace necesario su monitoreo. Las densidades de coliformes totales en el agua de los sitios estudiados, se ve reflejada en el semáforo como de calidad regular en color amarillo.

Tabla 10. Resultados del semáforo de calidad de agua en los once cenotes muestreados de la ZRGHAC.

Cumplimiento indicador de calidad de agua en la Zona de Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes.

Parámetro	Tanimax		Kalcuch		Noh Mozón		Bekal		Subinché		Útzil		Xpakay		Santa Cruz		Dzapacal		Chelentún		Bebelchén	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Sulfatos (mg/L)	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Cloruros (mg/L)	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Nitratos (mg/L)	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Nitritos (mg/L)	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Amonio (mg/L)	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Fosfatos (mg/L)	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Alcalinidad (mg/L)	Green	Green	Blue	Green	Blue	Blue	Blue	Green	Green	Yellow	Blue	Green	Blue	Blue	Yellow	Green	Blue	Green	Blue	Blue	Green	Green
Colif. fecales (NMP/100 ml)	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	ND	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	ND	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Colif. totales (NMP/100ml)	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	ND	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	ND	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
Temperatura (°C)	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
SDT	Green	Blue	Green	Blue	Yellow	Yellow	Yellow	Blue	Green	Blue	Yellow	Blue	Yellow	Yellow	Yellow	Blue	Yellow	Blue	Yellow	Yellow	Yellow	Blue
pH	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
OD (mg/L)	Yellow	Green	Green	Blue	Green	Blue	Blue	Green	Yellow	Blue	Green	Blue	Green	Blue	Yellow	Yellow	Yellow	Blue	Yellow	Blue	Green	Blue

Rangos	Calidad de Agua	
<50% de cumplimiento	Regular	La calidad del agua es regular y su consumo podría ocasionar efectos adversos a la salud
50% y 75% de cumplimiento	Buena	Buena calidad de agua, aunque se requiere tratamiento si se utilizará como fuente de abastecimiento humano
>75% de cumplimiento	Muy buena	Muy buena calidad de agua y puede ser utilizada como fuente de abastecimiento
Muestreos: 2015(1) y 2016 (2)		

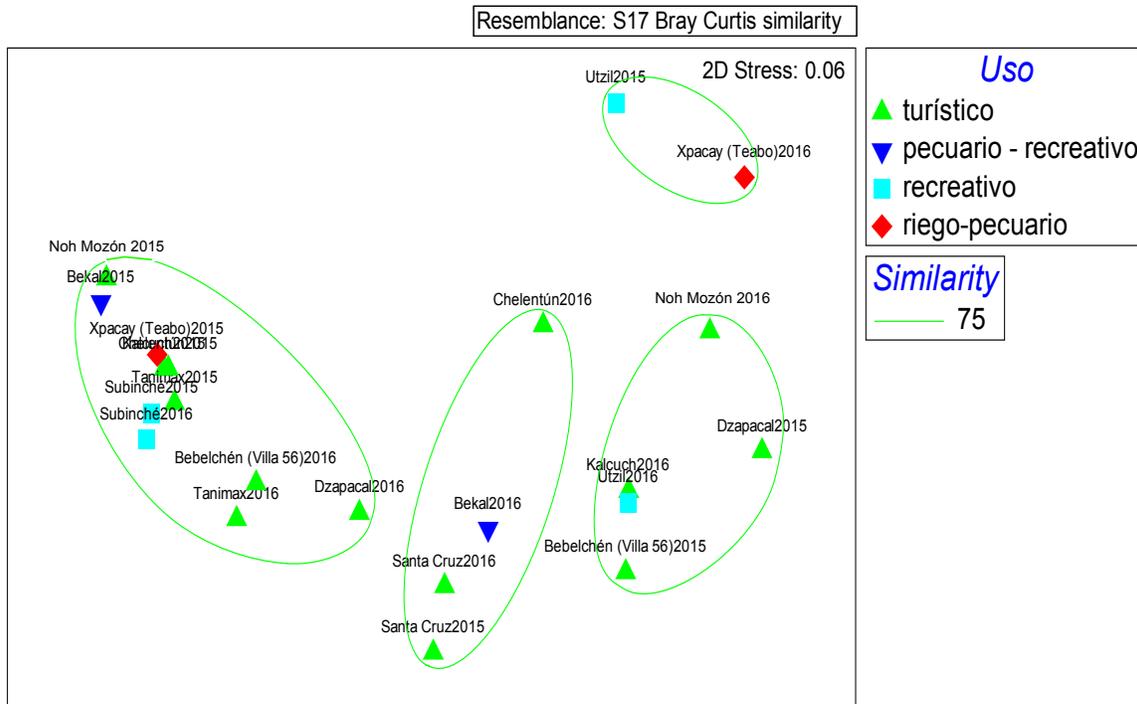
### ***Análisis de usos y calidad de agua***

Se realizó un análisis de similitud con el sistema Primer 6 con los parámetros de calidad del agua descritos en la Tabla 16, para los 11 cenotes en dos campañas de muestreo (2015 y 2016). Como se observa en la figura 25 se obtuvieron cuatro grupos bien diferenciados en los que existe similitud (75%) entre la calidad del agua de ambas campañas de muestreo para los parámetros analizados en relación al uso. De acuerdo con este análisis, se identifica diferencias con respecto a la calidad del agua entre muestreos en 8 de los 11 cenotes. En tres cenotes: Subinché, Santa Cruz, y Tanimax no muestran características diferentes en 2015 y 2016.

El primer grupo es el que contiene el mayor número de cenotes, seis de los cuales corresponden al muestreo de 2015 y cuatro al de 2016. Este grupo incluye todos los usos mostrados en la figura 25, prevaleciendo el uso turístico. En el caso de Kalcuch y Tanimax forman parte de la misma comunidad y su ubicación geográfica es muy cercana.

En el segundo grupo tres de los cenotes corresponden a los resultados obtenidos en 2016, exceptuando el cenote Santa Cruz, el cual corresponde al muestreo realizado en 2015. Cabe mencionar que Chelentún y Santa Cruz forman parte del mismo recorrido turístico que es ofertado a los visitantes y los cenotes de este grupo son semicerrados. El grupo tres se conforma por cinco cenotes, tres de ellos corresponden a los resultados del muestreo de 2016 y dos cenotes al muestreo de 2015; los cinco cenotes tienen una profundidad de 15 m o más, y en cuatro de ellos se realizan actividades turísticas.

El último grupo se conforma por dos cenotes Utzil y Teabo con profundidades de 40 m y 20 m respectivamente y ninguno de es de uso turístico. Se observa igualmente que en Subinché y Santa Cruz se mantienen en el mismo grupo para ambos muestreos, la calidad de agua en ambas campañas para esos usos y sitios es similar.



**Figura 25. Análisis de similitud entre la calidad del agua, los usos y las campañas de muestreo (2015 y 2016)**

Para contrastar la diferencia entre la calidad del agua (2015 y 2016) y los usos de los cenotes (turístico, recreativo, riego-pecuario y pecuario-recreativo) se realizó un análisis de varianza de dos vías. Los resultados muestran diferencias significativas entre el uso de los cenotes y las variables de conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, y oxígeno disuelto (valor p: 2.25E-06, 1.58E-06 y 0.0214 respectivamente, en rojo en Tabla 11). En el caso de la conductividad y los sólidos disueltos totales, estas diferencias están asociadas a que en el año 2015, las concentraciones de dichos parámetros fueron superiores a las medidas en 2016; así como concentraciones más bajas de oxígeno disuelto en 2015 con respecto a las medidas en 2016. En cuanto a la varianza entre los parámetros de calidad y los diversos usos, se encontró una diferencia significativa con respecto a los usos de los cenotes y la concentración de sulfatos. El único cenote que no se cataloga como de actividad turística o recreativa es Xpacay (Teabo), ya que en el cenote se realizan actividades pecuarias y de riego. Por otra parte, se realizó la prueba Tukey HSD, la cual nos indica el grupo que tiene diferencias significativas entre la calidad de agua y el uso, en este caso el Turístico-recreativo es el que muestra diferencias significativas.

**Tabla 10. Análisis de varianza (ANOVA) de dos vías. Se contrasta los resultados de calidad de agua obtenidos en los once cenotes muestreados 2015 y 2016, de acuerdo con el uso (NA: no aplica).**

Variable	Año de muestreo	Uso	TukeyHSD
	p	p	Uso
Temperatura	0.662	0.0878	
Conductividad eléctrica	2.25E-06	0.523	
Sólidos Disueltos Totales	1.58E-06	0.557	
pH	0.78	0.445	
Oxígeno Disuelto	0.0214	0.6621	
Coliformes Totales	0.0528	0.9809	
Coliformes Fecales	0.329	0.917	
Alcalinidad	0.242	0.527	
Sulfatos	0.366	0.0363	Turístico-recreativo
Cloruros	0.325	0.754	
Nitratos	0.565	0.35	
Nitritos	NA	NA	
Amonio	0.305	0.341	
Fosfatos	NA	NA	

Es importante mencionar que el acuífero es un sistema dinámico el cual puede presentar variaciones periódicas; sin embargo de manera general los resultados obtenidos reflejan una buena calidad de agua en ambos muestreos, como ya se mencionó en el apartado correspondiente.

### **Semáforo para el análisis de los servicios ecosistémicos y su relación con la calidad del agua**

Los servicios ecosistémicos identificados son en primer término el uso de agua para consumo humano (el agua es utilizada para la elaboración de alimentos, limpieza, para beber, etc.) y la barrera contra la intrusión salina la cual se asocia con el volumen de agua dulce disponible. Este servicio ecosistémico obtuvo resultados entre el 60% y 88% de cumplimiento reflejados en color amarillo y verde (Tabla 12). En el caso de barrera contra la intrusión salina, esta se mantiene ya que como lo muestran los perfiles de temperatura y conductividad de las figuras 13 y 14 no existe intrusión salina en los once cenotes estudiados.

En el caso del uso recreativo con contacto primario el servicio ecosistémico que principalmente se asocia es el de visita a cenotes como uso turístico, aunque también se encuentra la educación ambiental y la cosmovisión maya de los cenotes. Este servicio tiene un 100% de cumplimiento (semáforo en verde), considerando que se asocia al cumplimiento con los límites establecidos dicho uso, particularmente deberá cumplir en todos los casos con los límites establecidos para coliformes fecales (DOF, 1989). El uso para riego agrícola y el pecuario obtuvieron un color verde cumpliendo en un 100% con los parámetros de la normativa. Ambos usos se asocian directamente con los servicios ecosistémicos agua para riego agrícola y agua para uso pecuario respectivamente. Dado que las actividades productivas actuales son de autoconsumo, estas no representan una presión por el momento (semáforo en verde).

Para los criterios establecidos para la protección de la vida acuática los servicios ecosistémicos principales son: preservación de la biodiversidad, conducto y transportación de agua dulce, mantenimiento de la cobertura vegetal, depuración de masas de agua, investigación y educación ambiental, mostrando un cumplimiento inferior al 50% para algunos sitios estudiados y de 67% para otros dependiendo del muestreo. Exceptuando Tanimax, Belbechén y Santa Cruz que para ambos muestreos el nivel de cumplimiento es inferior al 50%. Es interesante observar la tendencia en el color del semáforo, en rojo aparecen los servicios ecosistémicos relacionados con el uso para protección de la vida acuática y en amarillo-verde los servicios ecosistémicos relacionados con el consumo, es decir la presión sobre el agua se ve reflejada en ambos servicios (Tabla 12).

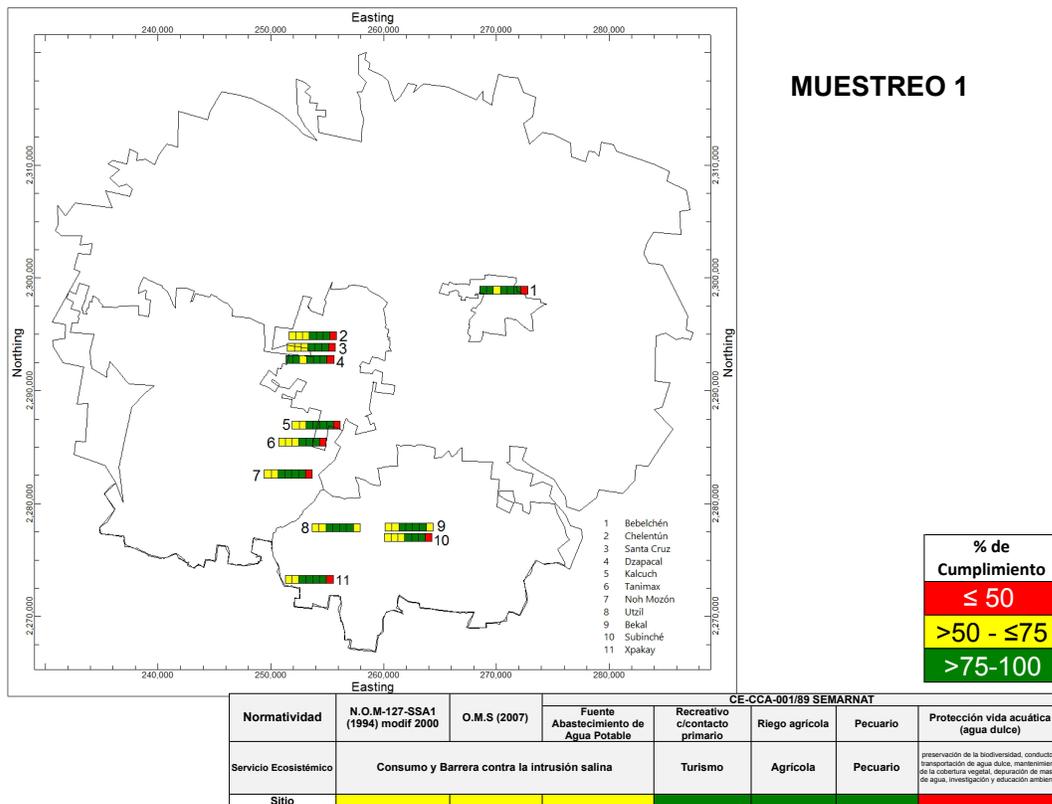
**Tabla 12. Nivel de cumplimiento de los servicios ecosistémicos que brinda el acuífero en relación a la calidad de agua de los once cenotes muestreados de la ZRGHAC (1: muestreo 2015, 2: muestreo 2016).**

Normatividad	N.O.M-127-SSA1 (1994) modif 2000	O.M.S (2007)	CE-CCA-001/89 SEMARNAT											
			Fuente Abastecimiento de Agua Potable		Recreativo c/contacto primario		Riego agrícola		Pecuario		Protección vida acuática (agua dulce)			
Servicios Ecosistémicos con relación directa	Consumo humano				Visita a cenotes		Agrícola		Pecuario		Preservación de la biodiversidad, depuración de masas de agua			
Servicios Ecosistémicos con relación indirecta	Barrera contra la intrusión salina, conducto y transportación de agua, depuración de masas de agua, recarga y captación de agua, educación ambiental, investigación.				Educación ambiental, Investigación, cosmovisión maya, consumo humano, recarga y captación de agua, preservación de biodiversidad		Agua para uso pecuario, barrera contra la intrusión salina, depuración de masas de agua, recarga y captación de agua, mantenimiento de cobertura vegetal, investigación, educación ambiental.		Agua para riego agrícola, barrera contra la intrusión salina, depuración de masas de agua, recarga y captación, mantenimiento de cobertura vegetal		Recarga y captación de agua de lluvia, conducto y transportación de agua, mantenimiento de cobertura vegetal, investigación, educación ambiental, consumo humano.			
Sitio	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Tanimax	70%	80%	75%	88%	64%	82%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	50%	50%
Kalcuch	70%	80%	75%	88%	82%	82%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	50%	67%
Noh Mozón	70%	67%	65%	83%	82%	80%	100%	ND	100%	ND	100%	100%	50%	67%
Bekal	70%	80%	75%	75%	82%	82%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	67%	50%
Subinché	70%	70%	75%	75%	64%	82%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	50%	67%
Útzil	70%	80%	75%	87%	82%	82%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	67%	50%
Xpakay	70%	80%	75%	83%	82%	80%	100%	ND	100%	ND	100%	100%	50%	67%
Santa Cruz	60%	70%	63%	87%	64%	73%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	50%	50%
Dzapacal	80%	80%	87%	87%	73%	82%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	50%	67%
Chelentún	70%	70%	75%	75%	73%	82%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	50%	67%
Bebelchén	80%	80%	87%	87%	73%	82%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	50%	50%

N.D.: resultado no disponible

% de Cumplimiento
≤ 50
>50 - ≤75
>75-100

Analizando espacialmente el semáforo de servicios ecosistémicos en relación a la calidad del agua, en las figuras 26 y 27 podemos observar en el semáforo que existe un mayor cumplimiento de los SE y la calidad del agua para el muestreo de 2016 con respecto al de 2015. Podemos inferir que las diferencias están influenciadas por la temporalidad, pero es necesario contar con un monitoreo sistemático que confirme estas diferencias. Igualmente, es importante que este seguimiento se realice para confirmar comportamientos o tendencias para cada cenote, y observar que el cumplimiento del servicio ecosistémico de consumo de agua sea superior al 60% en los cenotes de la ZRGHAC y que se reduzca la presión en el servicio de sustento para pasar del semáforo rojo al amarillo y verde. Los SE del acuífero producen valores múltiples y entrelazados (Bennett *et al.*, 2009) algunos servicios proveen beneficios a los usuarios, mientras que otros proveen beneficios a unos cuantos controlando la oferta relativa y demanda de los mismos. De manera general se deberá buscar que el semáforo se mantenga en verde-amarillo tanto los servicios de provisión y regulación como los servicios de sustento y establecer acciones para revertir el color en los servicios que están actualmente en rojo.



**Figura 26. Distribución espacial del análisis de los servicios ecosistémicos y su relación con la calidad del agua en los sitios estudiados en mayo de 2015.**

## MUESTREO 2

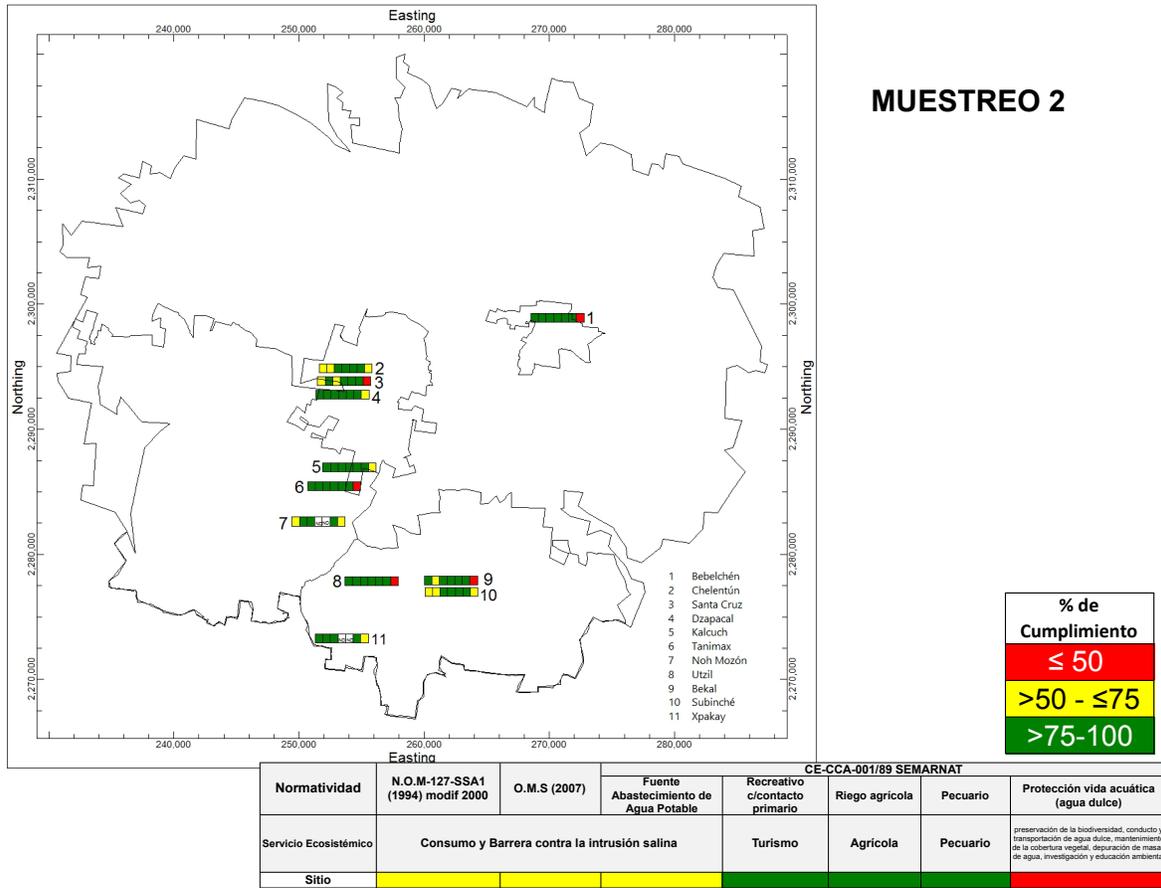


Figura 27. Distribución espacial del análisis de los servicios ecosistémicos y su relación con la calidad del agua en los sitios estudiados en mayo de 2016.

## Discusión

En general el agua de los cenotes estudiados en la ZRGHAC presenta de muy buena a buena calidad y cumple con los límites máximos permisibles establecidos en la normatividad mexicana y los de la Organización Mundial de la Salud, de acuerdo al semáforo definido para el análisis. Los resultados en este estudio son similares a los obtenidos históricamente por otras instituciones como CICY, UADY, SEDUMA, Hideyo Noguchi (Pacheco *et al.*, 2002; Hernández-Terrones *et al.*, 2011; SEDUMA, 2015; Polanco-Rodríguez, 2016). Dichas instituciones han estudiado alrededor de 50 cenotes, casi todos ellos ubicados en la ZRGHAC. Las diferencias que se presentan con otros estudios son atribuibles a diferencias de selección de sitios, características del cenote como la profundidad, precipitaciones o fenómenos naturales atípicos, temporalidad, y diferencias metodológicas, por mencionar algunas.

Los once cenotes estudiados se encuentran en la zona de recarga, criterio importante en la selección de los mismos para garantizar el seguimiento de la calidad del agua. Los resultados obtenidos en este estudio coinciden con los resultados reportados por Hernández-Terrones *et al.* (2011), Ayora-Domínguez (2014) y Sánchez-Ahuactzin *et al.* (sometido), donde se indica que el agua de los cenotes en la ZRGHAC es de buena calidad, de acuerdo a los límites establecidos en la NOM-127-SSA1-1994 y CE-CCA-001/89 (DOF, 1989).

En el ámbito local aún no existen criterios específicos, sin embargo el Estado de Yucatán tiene vigente el Reglamento de la Ley de Protección al Medio Ambiente del Estado de Yucatán en Materia de Cenotes, Cuevas y Grutas, que tiene por objeto “regular las disposiciones de la Ley de Protección al Medio Ambiente del Estado de Yucatán, en cuanto a la protección, restauración y preservación de los ecosistemas ubicados en los cenotes, cuevas y grutas, así como la prevención de su contaminación y su aprovechamiento racional, de manera que sea compatible la obtención de beneficios económicos y culturales con el equilibrio ecológico y la salud humana” (DOF, 2014).

Utilizar parámetros como la determinación de *Escherichia coli* como indicadores de contaminación fecal es una práctica bien establecida y tradicionalmente utilizada para la evaluación de la calidad del agua. En este trabajo la ausencia de coliformes fecales indica que las condiciones del agua de los sitios no representan ningún riesgo de salud para la

población. Sin embargo, Pacheco *et al.* (2002) reportan haber encontrado presencia de coliformes fecales en pozos someros y profundos cercanos a la planta Mérida 1, que aunque no se encuentran dentro de la ZRGHAC si abastecen de agua potable a la ciudad de Mérida, y ponen en evidencia la relevancia de incluir de manera sistemática este parámetro en cualquier análisis de calidad de agua.

Para evaluar la calidad de agua en ecosistemas acuáticos donde se realizan actividades turísticas y de recreación se tiene como referencia los criterios ecológicos de calidad de agua, en particular el seguimiento de los coliformes fecales, debido al riesgo de salud humana que puede ocasionar debido al contacto primario que existe con el agua (DOF, 1989). Si en los cenotes se busca adaptar la actividad turística como actividad de menor impacto para el ambiente, es fundamental mantener en la calidad del agua de dichos sitios (García *et al.*, 2015). Para la agricultura y la ganadería la exigencia de la calidad del agua varía aunque la cantidad de agua requerida sea mayor en relación a otros usos mencionados y dependa continuamente de la oferta disponible y la demanda relativa (Yahdjian *et al.*, 2015). Es necesario fomentar buenas prácticas ambientales con los operadores turísticos que aseguren el mantenimiento de la calidad del agua y proponer un valor integral del acuífero que considere el ámbito económico, ecológico y socio-cultural.

El análisis de los servicios ecosistémicos y su relación con la calidad del agua puede facilitar la comprensión y dimensionar la importancia del tema y a la vez lograr una interpretación de los datos más integral, no solo relacionada con parámetros permitidos sino con los usos, la demanda y la oferta del agua subterránea. La demanda por los servicios ecosistémicos ha recibido menos atención en comparación con las estimaciones de oferta que están relacionadas con la degradación o desaparición del servicio. El SE de recarga y captación de agua de lluvia es considerado en la clasificación de sustento, de los más representativos de la ZRGHAC, considerado el más importante además y el que los encuestados reconocen más (Capítulo II). Este SE no se encuentra en la tabla 11 ya que la normativa sobre calidad de agua enfocada a la salud humana no contempla ningún criterio para su evaluación. La recarga la establece la CONAGUA quien calcula la recarga media anual para cada región hidrológico-administrativa (RHA). En el caso de la RHA XII Península de Yucatán, ésta cuenta con la mayor recarga media anual a nivel nacional (ver Capítulo I). Aun cuando los indicadores sobre la recarga y la precipitación de la RHA Península de Yucatán son superiores a los del resto del país, éstos no tendrían el mismo

valor si la calidad del recurso hídrico en esta zona no fuera buena. Yahdjian *et al.* (2015), indican que en el caso de los servicios de provisión la demanda generalmente sobrepasa la oferta, en la zona de estudio no es así. Actualmente el volumen promedio diario de extracción de pozos profundos del municipio de Mérida es de 291 mil metros cúbicos diarios (INEGI, 2012) mientras que en los municipios que conforman la ZRGHAC oscila entre 0.5 y 6.4 mil metros cúbicos diarios (INEGI, 2012). De acuerdo a Hernández-Terrones *et al.* (2011), la Zona de Reserva Geohidrológica alberga alrededor de 108 200 000 m<sup>3</sup> cantidad que hasta ahora no rebasa la demanda actual. En una escala global, la oferta de los servicios ecosistémicos de sustento o soporte es mayor a la demanda. El uso humano no aplica ya que por definición los servicios de soporte no se utilizan directamente por las personas (Yahdjian *et al.*, 2015). Por esta razón es difícil identificar en el semáforo, los SE de sustento del acuífero relacionados directamente con los usos humanos (Tablas 10 y 11).

En el capítulo 2 se identificaron como servicios de regulación del acuífero el conducto y/o transportación del agua, la barrera contra la intrusión salina y la depuración de masas de agua. Si relacionamos estos tres servicios con la protección a la vida acuática en la tabla 10, observamos que el color rojo y amarillo (equivalentes a un cumplimiento de parámetros permitidos <50% y del 67%), indican una degradación de la vida acuática en los once cenotes y este incumplimiento pudiera estar ligado a la gran demanda de agua de los servicios de regulación. En relación a la depuración de las masas de agua, el monitoreo de nutrientes, elementos mayores y coliformes fecales, así como los parámetros como el oxígeno disuelto demuestran la capacidad del acuífero de filtrar y descomponer los residuos o cargas orgánicas que se vierten en el agua subterránea y que controla la presencia de patógenos (Batllori-Sampedro, 2015). Otro parámetro que está estrechamente relacionado con la calidad del agua subterránea es el fósforo, Irola-Sansores *et al.* (2013) lo identifican como elemento limitante en las comunidades de fitoplancton en cenotes oligotróficos del acuífero de la Península de Yucatán, al igual que lo reportado en este estudio con valores <LDM en los once cenotes estudiados.

Para el caso del SE de conducto y transportación de agua por ahora no existen parámetros relacionados con la calidad del agua y este SE a pesar de que la zona de estudio es reconocida por conducir agua subterránea, se requiere desarrollar mayor investigación cuantitativa al respecto.

En el caso del SE de barrera contra la intrusión salina, los perfiles de la columna de agua mostrados en el capítulo II, muestran que no existe intrusión marina en la ZRGHAC. Los resultados obtenidos en las concentraciones de cloruros, sulfatos, pH y temperatura también lo confirman, al igual que los estudios realizados en la ZRGHAC por Ayora-Domínguez (2014), y Sánchez-Ahuactzin *et al.* (sometido). Estos procedimientos derivan de un monitoreo de la calidad del agua que no sólo puede brindar información cualitativa sobre la intrusión salina sino también asegura los beneficios que brindan otros servicios ecosistémicos como el agua para uso agrícola, consumo humano o el impacto que puede tener con la protección de la vida acuática en el acuífero.

En la visita a cenotes se observó interdependencia entre los servicios ecosistémicos, los culturales (uso turístico y recreativo; cosmogonía maya de los cenotes; educación ambiental), de regulación (depuración de masas de agua), y de sustento (preservación de la biodiversidad, mantenimiento de cobertura vegetal y recarga de agua). La relación de estos SE con la calidad del agua podrían ser considerados indicadores para el uso sustentable de los cenotes en materia turística validando con un estudio mas amplio e incluyendo otros parámetros clave. Se identificaron cenotes que son utilizados simultáneamente para riego, cuidado de animales y para necesidades básicas del hogar, en el caso de algunos cenotes turísticos procuran tener alejadas actividades de agricultura y ganadería por el tema de la limpieza e imagen (Dzapacal, Santa Cruz, Chelentún, Tanimax), pero aún así se observó presencia de ganado y sembradío en cenotes de uso turístico (Bebelchén y Kalcuch).

El agua para riego agrícola y uso pecuario (provisión) y la visita a cenotes (cultural) se asocian a un valor económico en el mercado. En el caso de la agricultura y la ganadería le dan una valoración a la materia prima como producto final; en el caso de la visita a cenotes se realiza una valoración cuantitativa en la tarifa de entrada o acceso a los cenotes así como otros gastos ocasionados por el viaje. Estos usos además de tener un valor en el mercado ocasionan un cambio de uso de suelo. Se requiere un esfuerzo importante para visualizar al acuífero no solo de la ZRGHAC sino de toda la Península de Yucatán como un sistema complejo y vulnerable. A nivel local existe información fragmentada, no actualizada o no disponible sobre el volumen necesario de agua para mantener un cultivo, la actividad ganadera o textil y el impacto de las aguas residuales

generadas por estas actividades. Hoy en día, es necesario realizar una evaluación, de acuerdo con la Norma Internacional ISO 14046:2014 de gestión ambiental donde se menciona la importancia del cálculo de la huella hídrica (ISO, 2014).

Tanto la preservación de biodiversidad y la cobertura vegetal también son SE de sustento, que desde un enfoque biológico y estadístico, Stefanoni *et al.* (2013) pudieron pronosticar la riqueza de especies de plantas y biomasa, gracias a la estructura de la vegetación y a la heterogeneidad del hábitat. Desde un enfoque de política pública existen programas como REDD+ que ligan un programa de finanzas de carbono con la deforestación para mitigar efectos del cambio climático o el Programa de Servicios Ambientales Hidrológicos coordinado por CONAFOR y dirigido a la protección del bosque templado y tropical. Es necesario lograr introducir en la normatividad mexicana, además de los parámetros que pueden ocasionar un riesgo en la salud humana, incorporar indicadores o bioindicadores específicamente dirigidos a agua subterránea y su interrelación con otros ecosistemas como las selvas y manglares por mencionar algunos.

## CAPÍTULO IV. Valoración económica del agua en los cenotes de la ZRGHAC

### Introducción

Los usos que se le dan al agua, así como sus características hacen que sea un recurso importante y difícil de valorar. Debido a que el agua es esencial para la vida y la salud, como bien enfrenta, más que otros bienes, conflictos entre los valores sociales y culturales y el valor económico (Martínez y Dimas, 2007).

El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) sugiere que el costo del agua no debería superar el 3% de los ingresos del hogar (ONU, 2005). La valoración de los servicios ecosistémicos presenta diferentes retos, por un lado la identificación y agregación de preferencias de distintos individuos (Daily *et al.*, 2000) y, por el otro la incertidumbre propia de la dinámica de los ecosistemas que resulta ser compleja y multicausal (Carpenter y Folke, 2006). El tema de valoración de los servicios ecosistémicos también incluye un valor relativo que la sociedad asigna denominado valor sociocultural (Brauman *et al.*, 2007; Balvanera *et al.*, 2016). Dentro de la economía ambiental, los servicios ecosistémicos son conocidos como servicios ambientales. En las ciencias económicas, los servicios ambientales se limitan a ser valorados en términos monetarios de acuerdo al valor de uso o no uso (Barbier *et al.*, 2011) sin considerar el valor sociocultural y ecológico del ecosistema (Brauman *et al.*, 2007), aunque también existen métodos dentro las ciencias económicas que estiman el valor, pero no desde un punto de vista monetario.

El Modelo de Valoración Contingente es flexible y aplicable a un amplio rango de bienes ambientales y se utiliza principalmente para dar un valor a la calidad ambiental (Field, 1995), para los que no existen un valor en el mercado (Hoevenagel y Vander-Linden, 1993; Kolstad, 2011). Tal es el caso del agua proveniente del acuífero de la ZRGHAC. El Modelo permite conocer cómo actuarían los usuarios ante situaciones contingentes<sup>3</sup> y uno de los principales objetivos es conocer la cantidad máxima que están dispuestos a pagar los beneficiarios (Field, 1995). Con este método se pueden estimar valores de uso y no uso de los servicios ambientales. Tiene la ventaja de que es posible calcular el valor de un

---

<sup>3</sup> De acuerdo a la Real Academia Española la definición de contingente es: 1. (adj) que puede suceder o no suceder.; 2. Cuota que se señala a un país o a un industrial para la importación de determinadas mercancías; 3. Parte que cada uno paga o pone cuando son muchos quienes contribuyen para un mismo fin.

bien sin que sea necesario un estudio de preferencias del consumidor, es de fácil comprensión. En el método de la valoración contingente, los cuestionarios juegan el papel de un mercado hipotético, donde la oferta viene representada por la persona entrevistadora y la demanda por la entrevistada (Riera, 1994).

El método de valoración contingente es uno de los tres reconocidos por el Water Resources Council (1979). El método de valoración contingente intenta medir en pesos (o la moneda correspondiente), los cambios en el nivel de bienestar de las personas debido a un incremento o disminución de la cantidad o calidad de un bien. Esta medida, en unidades monetarias, suele expresarse en términos de la cantidad máxima que una persona pagaría por un bien. Es decir, lo que se suele conocer por la expresión *disposición o disponibilidad a pagar o al pago* (DAP). En el caso de bienes que no implican un costo monetario directo para el consumidor, esta disposición a pagar por el bien equivale al beneficio que tal consumidor obtiene.

Una forma en la que se obtienen estos datos es a través de encuestas basadas en las preferencias del consumidor integrando el valor ecológico y social, obteniendo así la disposición a pagar (DAP) de los beneficiarios (Brauman *et al.*, 2007). Estas encuestas en ocasiones son apoyadas por imágenes e información descriptiva que le permite al encuestado conocer el contexto con una visión más clara para evitar emociones adulteradas. Por estas razones la descripción adecuada del bien o servicio a valorar así como la descripción de los atributos más importantes y su entorno, son cruciales para lograr resultados más confiables (Field, 1995).

De acuerdo con Kolstad (2011), durante el diseño de la encuesta es necesario elegir el método de obtención de las respuestas al momento de preguntar particularmente por la DAP, entre las opciones se encuentran:

- *Pregunta directa*: es cuando de manera directa se plantea la pregunta de cuánto está dispuesto a pagar por mantener un servicio ambiental o por mantener los recursos naturales de un área específica. Este tipo de pregunta puede ocasionar que los encuestados dejen en blanco la pregunta. Se sugiere ir acompañada de un contexto para evitar que la valoración se realice en función de la interpretación de cada encuestado.

- *Juego de ofertas* (Randall *et al.*, 1974): en este método se inicia preguntando si está dispuesto a pagar algún determinado monto y si la respuesta del encuestado es positiva se continua incrementando el valor hasta que el encuestado indique la cantidad en la que ya no desea pagar. Al momento de realizar una propuesta de precios a partir de un monto específico puede tener un sesgo en las cantidades máximas y mínimas dispuestas a pagar. Se recomienda que estas se realice en persona para percibir a través del comportamiento del encuestado cuando ya no está dispuesto a pagar.
- *Tarjeta de pago*: que se refiere a utilizar tarjetas donde se muestran diversos montos para que el encuestado pueda seleccionar la que sea de su conformidad.
- *Referéndum o de selección discreta*: en este método se le pregunta al encuestado con una pregunta binominal si está dispuesto a pagar o no. Este método es recomendado por el panel del NOAA. Un área de oportunidad es los precios máximos y mínimos preestablecidos.

Algunas de las desventajas del Modelo de Valoración Contingente son que se pueden generar altas estimaciones de los daños a los recursos naturales; la asignación de una valoración económica para un solo bien no se replica en otros bienes o recursos de la misma índole, y puede existir ambigüedad por parte de los encuestados ya que los resultados se basan en la honestidad de sus respuestas. Suele suceder que la participación de la gente disminuye cuando el trámite de pago está de por medio (Kolstad, 2011). En el caso de las preguntas por referéndum o selección discreta es más probable que los encuestados si se expresen. El conocer las variables que influyen en la DAP de una persona brinda información adicional a la toma de decisiones (Perni y Martínez-Paz 2012). Tales variables representan las características socioeconómicas del individuo (por ejemplo, nivel de ingreso o escolaridad), pero también su grado de conocimiento o su relación con el objeto de la valoración (en este caso el acuífero).

## **Metodología**

### **Método de Valoración Contingente**

Se describe en orden cronológico las etapas (pueden variar dependiendo del estudio) utilizadas. Primero se definió lo que se quería medir en unidades monetarias (pesos mexicanos), de definió la población objetivo, la cual está relacionada con el bien a medir,

se midió la máxima disposición a pagar de la persona entrevistada. Se definió igualmente la modalidad de aplicación de la encuesta y la definición de la muestra. Como parte del procedimiento para un diseño de estudio de un Método de Valoración Contingente, es necesario seguir una serie de pasos (Kolstad, 2011), cuatro de los cuales se encuentran descritos en el capítulo II y III:

1. *Definir un escenario de mercado*, donde se describe el bien o servicio que será valorado, realizando para ello el análisis de la calidad del agua de los once cenotes ubicados en la ZRGHAC descrita en el capítulo III, y se comparó con algunos estudios realizados los últimos diez años.
2. *Seleccionar un método de obtención*, en este caso se definió utilizar una pregunta de selección discreta y otra como pregunta directa. Pregunta 18. ¿Cree que la población que se ve beneficiada con los servicios que proporcionan los cenotes, cuevas y cavernas deban pagar una cuota extra para la ZRGHAC se mantenga limpia y disponible en los próximos diez años?  
Pregunta 19. ¿Cuánto estaría dispuesto a pagar mensualmente para que los cenotes, cuevas y/o cavernas se mantengan limpios los próximos diez años?
3. *Diseñar la administración del mercado*. Consistió en diseñar un instrumento para conocer las percepciones y necesidades de la población objetivo. En este trabajo se elaboró una encuesta con 21 preguntas. La encuesta fue aplicada a través del Google Docs vía internet para acceder más fácilmente y aprovechar los recursos económicos y humanos disponibles. En el diseño de la encuesta se buscó igualmente obtener información sobre los servicios ecosistémicos proporcionados por el acuífero de la ZRGHAC y sus resultados se encuentran detallados en el capítulo 2 de esta tesis. Como la población suele ser demasiado grande para ser entrevistada en su totalidad, se selecciona sólo una parte, que suele ser relativamente pequeña.
4. *Diseño de la muestra*. La población seleccionada fueron los habitantes de la ciudad de Mérida debido a la urbanización, capacidad de pago y cercanía con la ZRGHAC y quienes serán en un futuro cercano los principales beneficiarios del agua que de la zona de reserva. Una de las características de los encuestados es que supiera utilizar una Tablet o manejar una computadora con internet para contestar la encuesta, aunque en ocasiones se realizó el llenado de la encuesta en papel a falta de servicio de internet. La técnica de muestreo utilizada se considera de diseño no probabilístico (Bateman *et al.*, 2002) o exploratoria, se aseguró que participaran encuestados con

diversos perfiles, que las preguntas se contestaran lo más completas posible y que los encuestados radicaran en Yucatán. La aplicación de encuestas no fue aleatoria sino contralada por el encuestador asegurando la participación de diversos rangos de edad, ingresos, género, escolaridad, etc., y a la vez optimizando los recursos económicos (Mandujano, 1998). Como se muestra en el capítulo 2, el número de encuestas aplicadas fue de 262. En base al cálculo realizado se obtuvo un tamaño de muestra óptimo (270), por lo que se tiene margen de error del 6% y un nivel de confianza de 90%.

5. *Diseño experimental y estimación de la DAP.* El diseño de la encuesta para obtener la DAP, su administración y su análisis estadístico es muy importante en la valoración contingente. Los modelos de regresión son aplicables en una gran diversidad de campos y se utilizan principalmente en información de tipo encuesta (Gujarati, 1997). Existen diversos métodos para estimar modelos de regresión entre ellos está el modelo Logit, que es un modelo de probabilidad en forma no lineal con X (es decir con forma de S) en la fuente de distribución acumulativa logística. Este modelo garantiza que las probabilidades estimadas se encuentren dentro del rango 0-1 y que están relacionadas en forma no lineal con las variables explicativas (Gujarati, 1997). Dentro de este proceso el logaritmo que aparenta ser altamente no lineal se convierte en un modelo lineal (en los parámetros) expresado de la siguiente manera:

$$L_i = \ln \left( \frac{P_i}{1 - P_i} \right) = \beta_i + \sum_{j=2}^k \beta_j x_{ij}$$

La variable dependiente para efectos de este trabajo es la DAP, que es una variable dicótoma por naturaleza donde sólo existen los valores de 0 ó 1; el 0 significa que no está dispuesto a pagar y el 1 que sí están dispuestos; mientras que las variables independientes seleccionadas fueron: 1) el nivel de escolaridad, 2) el ingreso familiar, 3) el número de integrantes del hogar, 4) el servicio ecosistémico de agua para riego agrícola del acuífero y 5) el servicio ecosistémico de recarga y captación de agua de lluvia también del acuífero. Cabe señalar que a lo largo del proceso se descartaron variables como el género, la edad, profesión, lugar de residencia, visita a cenotes, conocimiento de la ZRGHAC debido a que no mostraron un alto nivel de significancia estadística y económica. La base de datos de los resultados obtenidos de la encuesta se convirtió a un sistema binario. El programa econométrico utilizado fue Gretl, el cual

está diseñado para el análisis estadístico donde se utilizan técnicas de estimación de máxima verosimilitud; aunque también Excel permitió manipular la base de datos.

En este trabajo el monto de la disposición a pagar (DAP) se obtuvo calculando el promedio de los resultados de la pregunta 19, al cual se le asignaron valores intermedios a los rangos establecidos. Adicionalmente se realizaron algunas estimaciones y proyecciones en relación a diversos porcentajes de participación de habitantes de Mérida DAP y hogares con tomas de agua. Se realizó un análisis multivariado entre las variables cualitativas independientes derivadas de la encuesta y asignando como variable dependiente la DAP. También se analizaron algunas variables independientes a través de tablas de contingencia y el valor de Chi cuadrada para identificar relaciones entre algunos de los resultados obtenidos en la encuesta con respecto a la DAP.

## **Resultados**

En base a las 5 etapas definidas para la aplicación del Modelo de Valoración Contingente, las primeras cuatro están documentadas en los capítulos II y III. En este capítulo se detalla la última etapa del modelo, utilizando la información de dichos capítulos.

*Diseño experimental y estimación de la DAP.* El diseño de la encuesta para obtener la DAP, su administración y su análisis estadístico fue importante en la valoración contingente. En este trabajo el monto de la disposición a pagar (DAP) se obtuvo calculando el promedio de los resultados de la pregunta 19, al cual se le asignaron valores intermedios a los rangos establecidos. Se realizó un análisis multivariado entre las variables cualitativas independientes derivadas de la encuesta y asignando como variable dependiente la DAP. También se analizaron algunas variables independientes a través de tablas de contingencia y el valor de Chi cuadrada para identificar relaciones entre algunos de los resultados obtenidos en la encuesta con respecto a la DAP.

La figura 27 presenta la DAP en relación a la edad, se observa que el rango de edad de los encuestados con DAP es de 20 a 50 años y los montos más recurrentes oscilan entre los \$25 pesos y \$150 pesos mensuales, y muestra que la edad no es un factor en relación a la DAP.

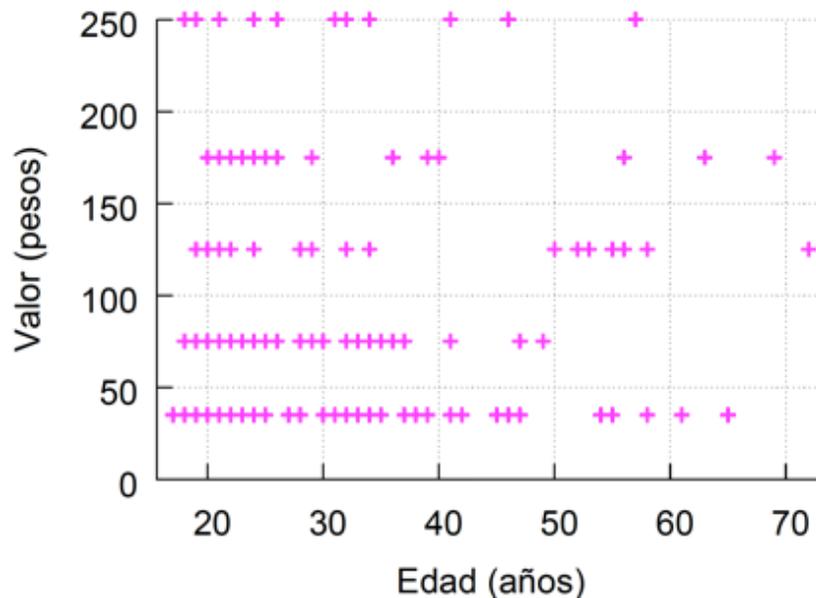


Figura 28. Gráfica sobre la relación de la edad y DAP de los habitantes de Yucatán.

En la Tabla 13 se puede observar que el comportamiento de hombres y mujeres de Yucatán es muy similar en relación a la disposición a pagar por conservar los cenotes (77% mujeres y 76% hombres). De los 262 personas encuestadas sólo 200 respondieron de manera afirmativa en estar dispuestos a pagar. De los 200 encuestados que tienen disposición a pagar, 137 seleccionaron los rangos entre \$24 y \$50 pesos o el de \$51 a \$100 pesos mensuales (Tabla 13).

Tabla 12. Disposición a pagar según el género del encuestado y monto máximo.

Género	Número de encuestados	Si se tiene DAP		No se tiene DAP		Sin responder		Pago de hasta \$ 100 pesos MX	
		Número	%	Número	%	Número	%	Número	%
Mujeres	154	118	77	34	22	2	1	85	72
Hombres	108	82	76	24	22	2	2	52	63
<b>Total</b>	<b>262</b>	<b>200</b>	<b>76</b>	<b>58</b>	<b>22</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>137</b>	<b>69</b>

### Aplicación del Modelo Logit

Se realizaron varias combinaciones de variables socio-económicas categóricas hasta encontrar una combinación de cinco variables independientes significativas considerando

siempre la DAP como variable dependiente. Este proceso fue a través de un modelo econométrico de variable dependiente limitada Logit Binario, con la finalidad de reconocer cuáles son las principales características de los usuarios dispuestos a pagar por conservar la calidad del agua de los cenotes (Tabla 14).

Las cinco variables seleccionadas para el modelo corresponden a tres características generales de los encuestados y dos servicios ecosistémicos del acuífero, de acuerdo a su importancia económica y estadística (\*10% de significancia, \*\*5% de significancia y \*\*\*1% de significancia), las cuales se analizan en los siguientes párrafos. Cuando no se tiene (\*), indica que no tiene significancia estadística, pero que es importante considerarla en el análisis global desde un punto de vista económico social. Lo importante en la construcción de los modelos econométricos es buscar una combinación de variables que sean importantes ya sea desde un punto de vista estadístico y/o desde un punto de vista económico.

**Tabla 13. Modelo de variable dependiente limitada Logit Binario. n=224 (Nota: a las 262 encuestas se restaron 38 ausentes o incompletas).**

Variables	Coefficiente	Desviación típica	z	Pendiente	Valor de p	Significancia
Disposición a pagar	2.42	0.81	2.98		0.00	***
Escolaridad	-0.51	0.23	-2.26	-0.09	0.02	**
Ingreso	0.21	0.14	1.5	0.04	0.13	
Integrantes de familia	-0.19	0.10	-1.84	-0.03	0.07	*
Agrícola	0.77	0.36	2.13	0.12	0.03	**
Recarga	0.01	0.43	0.03	0.04	0.97	
Media de la variable dependiente	0.77	Desviación típica de la variable dependiente		0.42		
R <sup>2</sup> McFadden	0.047	R <sup>2</sup> corregido		-0.003		
Log-verosimilitud	-114.51	Criterio de Akaike		241.03		
Criterio de Schwarz	261.50	Criterio de Hannan-Quinn		249.29		
Número de casos correctamente predichos= 171 (76.3%)						
f (beta 'x) en la media de las variables independientes = 0.168						
Contraste de razón de verosimilitudes : Chi-cuadrada (S) = 11.307 [0.0457]						

Fuente: Gretl

El valor de R-cuadrado de McFadden (0.047) de la tabla 14, si bien es relativamente bajo, en este tipo de modelos probabilísticos no se tiene ajustes elevados. Es importante

destacar que de las cinco variables que entran en el modelo, tres son significativas. Existen otras variables que pueden ser significativas desde el punto de vista estadístico, sin embargo no se incluyeron en la encuesta. El estudio de la DAP de los usuarios del acuífero es un tema poco estudiado, Christoph *et al.* (2014) identifican otras variables que no se consideraron en el modelo como la corrupción, la confianza a las instituciones gubernamentales que administran el pago de servicios ambientales, la forma de organización de los grupos sociales y su nivel de involucramiento con la toma de decisiones, el trabajo de las tierras y el tipo de actividades productivas que se realizan gracias a las características del sitio, los peligros relacionados al uso de sus tierras y patrimonio, así como la escasez del recurso, también hacen mención a la educación, edad e ingreso económico.

La escolaridad, los integrantes de familia y agrícola son tres variables significativas estadísticamente. Las otras dos (ingreso y recarga) no son significativas estadísticamente, pero no por eso no tienen ningún peso ya que son importantes desde un punto de vista económico. Cuando se plantea un modelo econométrico no necesariamente todas las variables deben ser estadísticamente significativas (asteriscos Tabla 14), ni tampoco todas no deben ser estadísticamente significativas, debe existir un equilibrio.

#### *a) Escolaridad*

De acuerdo con los resultados obtenidos del Modelo Logit (Tabla 14), la disposición a pagar disminuye en un 9% en relación a un mayor grado de escolaridad. En otras palabras, las personas sin estudios se encuentran más dispuestas a pagar. En la tabla 15 se muestra el porcentaje de personas DAP en relación al nivel de estudios. De manera general la disposición a pagar es superior al 70% en los encuestados sin importar el nivel de escolaridad. Si bien existe una mayor disposición a pagar por personas de menor escolaridad, las personas con Maestría y/o Doctorado indicaron un monto superior de DAP. Sin embargo, también es importante destacar que la DAP de las personas con menor escolaridad también puede estar relacionado con la carencia de la infraestructura y/o un suministro adecuado, a una mayor sensibilidad en relación al agua (cantidad y calidad).

**Tabla 14. Escolaridad y DAP por mantener limpios los cenotes de la ZRGHAC.**

Escolaridad	Encuestados	Si están DAP		Promedio DAP
		#	%	
Secundaria y/o preparatoria terminada	125	96	76.80%	\$ 86
Universidad terminada	76	55	72.37%	\$ 87
Maestría y/o Doctorado terminado	54	43	79.63%	\$ 99
Ninguna de las anteriores	7	6	85.71%	\$ 87

Como se observa en la tabla 15, existe una DAP de los habitantes en general, sin que la escolaridad sea un factor que incida de manera directa. En el diseño de la estrategia para la valoración de los servicios ecosistémicos fue importante no tener una limitante en relación a la escolaridad. Los resultados obtenidos muestran que la escolaridad no es una variable que tenga un peso al momento de establecer una estrategia en el cobro de una tarifa por mantener los servicios ecosistémicos que provee el acuífero en la ZRGHAC. No obstante, los resultados obtenidos indican la necesidad de profundizar en este aspecto.

*b) Ingreso económico familiar*

La disposición a pagar aumenta en un 4% a medida que el ingreso familiar aumenta (Tabla 14). Se contemplaron rangos con diferencias de \$8000 pesos, y el rango predominante fue entre \$8000 y \$16000 pesos. Se infiere que a mayor estabilidad económica existen mayor probabilidad de que la personas estén dispuestas a pagar (DAP) una cuota para la conservación y cuidado del agua. Aproximadamente el 60% de las personas que ganan entre \$8000 y \$16000 pesos están dispuestas a pagar entre \$87 y \$98. El promedio de la DAP para que el agua de los cenotes, cuevas y/o cavernas se mantengan limpios los próximos diez años de acuerdo a los datos obtenidos es de **\$90.00** pesos mensuales por persona (Tabla 16).

**Tabla 15. Relación del ingreso familiar y la DAP.**

Ingreso mensual (pesos)	Representatividad en la muestra		Representatividad SI están DAP		DAP
	No.	%	No.	%	\$ MX
Menos de \$8 000	58	22.14	45	60.52	98
De \$8 000 a \$16 000	97	37.02	74	59.51	87
De \$16 000 a \$24 000	40	15.27	32	62.40	80
De \$24 000 a \$32 000	24	9.16	21	68.25	104
Más de \$32 000	15	5.73	11	57.20	115
Sin ingresos	28	10.69	21	58.50	58
	262	100.00	204	100.00	<b>90</b>

*c) Integrantes de la familia*

A medida que el número de integrantes de una familia aumenta, la disposición a pagar disminuye en un 3% (Tabla 14). Considerando que la demanda de recursos económicos de una familia con un mayor número de integrantes es más a la de una familia pequeña, la posibilidad de pagar una cuota extra por mantener los cenotes limpios disminuye. La tabla 17 presenta el comportamiento de la DAP de acuerdo al número de integrantes familiares. Tres cuartas partes de los encuestados están dispuestos a pagar \$100 o menos de manera mensual por mantener la calidad del agua de los cenotes de la ZRGHAC.

**Tabla 16. Relación entre el número de integrantes de familia y la DAP.**

Integrantes familiares	Encuestados DAP			
	≥ \$100	\$101 ≤ \$200	≤ \$201	Total
1	7	5	0	12
2	12	4	2	18
3	19	6	0	25
4	44	10	4	58
5	28	8	3	39
6 o más	12	4	2	18
En blanco				4

#### *d) Agua para riego agrícola (SE)*

La disposición a pagar se incrementa en un 12% en los encuestados que identifican el servicio ecosistémico de agua para riego agrícola. El servicio que ofrecen los cenotes para utilizar el agua para el riego de cultivos es muy importante ya que es un recurso necesario para la obtención de alimentos y es considerado como servicio de provisión. De manera general la actividad agrícola es una de las principales consumidoras de agua. Dentro de la zona de estudio se ocupa el 14% del total del agua extraída a pesar de que la agricultura que se practica es principalmente de autoconsumo.

#### *e) Recarga y captación por agua de lluvia*

La disposición a pagar incrementa en un 0.4% de los encuestados que identifican el servicio ecosistémico de recarga y captación de agua de lluvia. Este servicio clasificado como de sustento fue el más identificado y el más popular al ser seleccionado como el más importante por los encuestados; sin embargo es complejo medirlo cuantitativamente ya que involucra procesos muy dinámicos y poco estudiados como la evapotranspiración, flujos subterráneos, permeabilidad, porosidad, infiltración y precipitación por mencionar algunos. Sin considerar en el análisis la variable dependiente (DAP), el valor de p más alto es el de la recarga (Tabla 14). En comparación con el servicio de agua para riego agrícola su incremento por la disposición a pagar es menor y puede atribuirse a que es menos tangible y medible por los beneficiarios, aunque en términos de ecosistema esta característica le concede atributos importantes y es fundamental para que se den el resto de los servicios ecosistémicos.

### **Análisis Estadístico**

Para identificar las diferencias estadísticamente significativas a través de las tablas de contingencia y de Chi cuadrada se plantearon las siguientes hipótesis:

Las hipótesis nulas:

- HO: No hay diferencias significativas con respecto a la DAP y la escolaridad
- HO: No hay diferencias significativas con respecto a la DAP y el número de integrantes de familia
- HO: No hay diferencias significativas con respecto a la DAP y el ingreso económico mensual
- HO: No hay diferencias significativas con respecto a la DAP y el género

Las hipótesis alternativas:

- HA: La escolaridad y la DAP están relacionadas
- HA: El número de integrantes y la DAP están relacionados
- HA: El monto de ingreso mensual y la DAP están relacionadas
- HA: El género y la DAP están relacionadas

Los resultados reflejan que no existe evidencia suficiente como para aceptar la hipótesis alternativas y no hay diferencias significativas con respecto a ninguna de las 4 variables mencionadas (género, escolaridad, ingreso económico y número de integrantes de familia) con relación a la DAP de los encuestados (Tabla 18).

**Tabla 17. Resultados análisis estadístico entre las variables y la DAP (Chi Cuadrada,  $\alpha=0.05$ )**

<b>Variable</b>	<b>Número de encuestados</b>	<b>p valor</b>
Escolaridad	225	0.18
Integrantes de familia	223	0.37
Ingreso	249	0.97
Género	258	0.95

### **Proyecciones y escenarios sobre la DAP**

Además de visualizar una disposición a pagar obtenida a través de los visitantes de los cenotes, también se puede hacer a través de los hogares que reciben agua de calidad proveniente de los mismo. Considerando algunos datos generales sobre la ciudad de Mérida y el estado de Yucatán como número de habitantes de Mérida (892,363 habitantes), hogares con agua entubada (169,836 hogares) y total de viviendas (226,448 viviendas) (INEGI, 2012; INEGI, 2015). Se realizaron distintos escenarios sobre el alcance de esta valoración económica que pueden ser una oportunidad de recaudación o modalidad de pago por servicios ambientales enfocado a mantener la calidad de agua de los cenotes de la ZRGHAC. En la tabla 18 se presentan los montos que se podrían recaudar de acuerdo con los hogares que cuentan con el servicio de agua entubada. El 75% de hogares en Mérida cuentan con servicio de agua entubada. También se elaboró un cálculo según las tomas de agua existentes y otro con el 52% de los habitantes de

Mérida considerados como población económicamente activa. En cuanto a la periodicidad de los pagos, mientras que en el modelo de Costo de viaje se espera recibir 2 pagos anualmente, en las proyecciones mensuales realizadas el ingreso varía según el porcentaje de participación de los usuarios que viven en Mérida con servicio de agua entubada, tomas instaladas o que son económicamente activos (Tabla 19). Si se logrará la participación de un 10% (opción menos optimista) de los hogares que poseen agua entubada (tabla 18) se recaudarían \$19,535,520 pesos anuales. Por el contrario una opción más positiva que considere la participación del 70% tendría una derrama de \$136,748,604 pesos anuales. Otra alternativa es realizar una estimación considerando la participación de las personas económicamente activas, ya que representan la mitad de la población en Mérida; aunque este planteamiento resulta un poco desventajoso para las personas que también son usuarios pero por el solo hecho de no tener un ingreso laboral se encontrarían exentos de hacer el pago. Como usuarios se consideran los habitantes de Mérida, aunque en un estudio complementario se podrían incluir las percepciones y DAP de los visitantes o turistas nacionales e internacionales. Estos datos implican una mayor inversión en recursos económicos y humanos siendo las principales causas de omisión en este trabajo.

En la tabla 20 se realizó un escenario donde se presenta el porcentaje de hogares que cuentan con estos servicios utilizando los diferentes tarifas (superiores e inferiores al monto establecido como DAP), es decir \$80, \$85, \$90, \$45 y \$22 pesos; estas tarifas se engloban a las tarifas domésticas mensuales establecidas por JAPAY que oscilan en promedio entre \$47 y \$72 pesos, tarifas base cuando no se superan los límites de cuota por metro cúbico o cuando se modifica el tipo de uso doméstico por el uso comercial, hotelero, etc. Considerando entonces el escenario menos deseado: monto más bajo (\$22) con la participación de un 10% de los hogares se podrían recaudar anualmente \$4,775,352 pesos, recaudación muy inferior al escenario planteado con un 70% de las personas que tienen DAP \$90 pesos, con una recaudación anual de \$136,748,604 pesos. Las estimaciones y los escenarios nos permiten visualizar claramente la importancia de desarrollar una estrategia para identificar los principales servicios ecosistémicos que provee el acuífero de la ZRGHAC y el valor que una muestra de la población de la ciudad de Mérida les confiere, por lo que se hace necesario diseñar e implementar un programa a través de la SEDUMA y las autoridades en la materia.

**Tabla 19. Estimación de montos mensuales en relación al porcentaje de DAP (fuente: INEGI, 2012).**

	Disposición a pagar (DAP)									
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
<b>Total de hogares con agua entubada por mes *</b>	\$1,627,960	\$3,255,919	\$4,883,879	\$6,511,838	\$8,139,798	\$9,767,757	\$11,395,717	\$13,023,676	\$14,651,636	\$16,279,595
<b>Total tomas domiciliarias **</b>	\$2,645,730	\$5,291,460	\$7,937,190	\$10,582,920	\$13,228,650	\$15,874,380	\$18,520,110	\$21,165,840	\$23,811,570	\$26,457,300
<b>Total personas económicamente activas***</b>	\$4,176,259	\$8,352,518	\$12,528,777	\$16,705,035	\$20,881,294	\$25,057,553	\$29,233,812	\$33,410,071	\$37,586,330	\$41,762,588

\* La DAP mensual de hogares con agua entubada se calculó considerando el número de habitantes en Mérida (892,363) entre el promedio de habitantes por vivienda (3.7). Al resultado de esta operación (241,179 hogares) se le calculó el 75% considerando que este porcentaje cuenta con agua entubada (180,884 hogares con agua entubada).

\*\* Tomas domiciliarias instaladas en Mérida (domésticas) : 293,970 tomas

\*\*\* El porcentaje de las personas económicamente activas en Mérida es del 52% de la población (464,028 habitantes)

**Tabla 20. Escenarios con distintos montos de DAP en relación del porcentaje de hogares con servicio de agua entubada.**

Monto a pagar (MX pesos)	Hogares con servicio de agua entubada									
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
\$ 80	\$ 1,447,075	\$ 2,894,150	\$ 4,341,225	\$ 5,788,301	\$ 7,235,376	\$ 8,682,451	\$10,129,526	\$11,576,601	\$ 13,023,676	\$ 14,470,751
\$ 85	\$ 1,537,517	\$ 3,075,035	\$ 4,612,552	\$ 6,150,069	\$ 7,687,587	\$ 9,225,104	\$10,762,621	\$12,300,139	\$ 13,837,656	\$ 15,375,173
<b>\$ 90</b>	<b>\$ 1,627,960</b>	<b>\$ 3,255,919</b>	<b>\$ 4,883,879</b>	<b>\$ 6,511,838</b>	<b>\$ 8,139,798</b>	<b>\$ 9,767,757</b>	<b>\$11,395,717</b>	<b>\$13,023,676</b>	<b>\$ 14,651,636</b>	<b>\$ 16,279,595</b>
\$ 45	\$ 813,980	\$ 1,627,960	\$ 2,441,939	\$ 3,255,919	\$ 4,069,899	\$ 4,883,879	\$ 5,697,858	\$ 6,511,838	\$ 7,325,818	\$ 8,139,798
\$ 22	\$ 397,946	\$ 795,891	\$ 1,193,837	\$ 1,591,783	\$ 1,989,728	\$ 2,387,674	\$ 2,785,620	\$ 3,183,565	\$ 3,581,511	\$ 3,979,457

## Discusión

La DAP es de \$90 pesos mensuales por persona, entendido como el (la) jefe de familia por hogar. Si comparamos con lo publicado en el proyecto de Saneamiento y Manejo Integral de los Cenotes, la disposición a pagar de los encuestados por viaje a los cenotes fue de \$61 pesos y se utilizó el Método de Costo de Viaje y el Método de Valoración Contingente para obtener este cálculo, con una disposición a pagar anual de \$10,977,149 pesos (SEDUMA, 2011). En dicho estudio se aplicaron 277 encuestas con 20 cenotes objetivo, ubicados en los municipios de Cuzamá, Homún, Huhí, Mama, Sanahcat, Sotuta, Tecoh y Tekit que cuentan con potencial turístico. Es importante resaltar estos datos ya que el número de encuestados es similar al de este trabajo, sin embargo la población objetivo fue diferente. La DAP del presente estudio es \$29 pesos mas alta, con un numero equivalente de encuestas.

Quizá podríamos decir que si la muestra fuera mayor, los resultados se pudieron ajustar de mejor manera, sin embargo los resultados obtenidos con el tamaño de muestra utilizada, son válidos en un 100%. La prueba de Chi Cuadrada es importante, aun cuando muestra relaciones entre dos variables sin considerar otras variables y que no muestran la relación o la dirección de la relación o que variable afecta a la otra. Mientras que una regresión permite estudiar una relación ya que tenemos una variable dependiente y otras independientes, y la relación entre una dependiente y otra independiente se puede afectar de manera indirecta por otra variable en el modelo que se utilice.

### *Habitantes vs. visitantes*

Yahdjian *et al.* (2015) indican que existen diversos usuarios con distintas necesidades para los servicios ecosistémicos. En el análisis de los resultados obtenido existen dos usuarios principales del acuífero: las personas locales, considerando a los habitantes de todo el Estado de Yucatán; y los visitantes de los cenotes que pueden ser habitantes de la región, de otros estados o incluso de otros países. Se compararon las cifras de DAP de los habitantes de Mérida principalmente con los ingresos anuales que tienen los operadores turísticos o las tarifas para visitar los cenotes. De acuerdo con la SEDUMA (2015) las dos cooperativas ubicadas en el municipio de Cuzamá tuvieron una derrama económica anual de \$130,000 pesos en el año 2012, mientras que su tarifa por truck para 2016 es de \$350 pesos (esta tarifa incluye la visita a 3 cenotes y el transporte hasta para 4 personas; si se realiza la división, la tarifa por cenote por persona es de alrededor de

\$30 pesos). Si se comparan los \$130,000 pesos recaudados en 2012 por los operadores turísticos con la estimación de \$19,535,520 pesos anuales que representan la DAP del 10% de los hogares con servicios de agua entubada (tabla 17); el ingreso sería mucho mayor por el pago de los usuarios con hogares con servicio de agua entubada que la misma derrama de la actividad de un parador turístico de la zona. No es fácil obtener información confiable y estandarizada sobre el número de visitantes a través de los operadores turísticos; ya que algunos carecen de registros y una regulación de tarifas, no sólo en el estado de Yucatán sino en toda la Península. También se reconoce que los visitantes pueden tener una percepción y DAP diferente, dependiendo del sitio visitado y de la experiencia obtenida.

#### *Relación de la calidad del agua y DAP*

Los resultados obtenidos muestran que de las 262 personas encuestadas, 200 personas (76%) están dispuestas a pagar por mantener limpios los cenotes. Por lo tanto existe gran aceptación por la población por mantener la calidad de agua de los mismos. De acuerdo con los resultados publicados por la SEDUMA (2015), para el 98.5% de los hogares de Yucatán es importante en primer término la calidad del agua de los cenotes (SEDUMA 2015). En el caso del agua para riego agrícola puede ser más fácilmente cuantificable en términos de producción agrícola y volumen de agua requerida y en el caso de la recarga y captación de agua de lluvia es dinámico por la cantidad de procesos biogeoquímicos que se llevan a cabo además de ser la principal característica por la que fue decretada como zona de reserva aún siendo un servicio poco visible ya que es subterráneo y estrechamente ligado a la calidad. La modelización de la DAP permite conocer sobre las variables que es posible actuar para incrementar la aceptabilidad social de las actuaciones de mejora con respecto al acuífero, pero también con respecto al medioambiente, nos permite comprobar si las respuestas de que proporcionan las personas sobre su DAP están o no en concordancia con la teoría económica. De acuerdo con Christoph *et al.* (2014), los arreglos institucionales, la capacidad humana y la percepción del contexto de los recursos naturales influyen significativamente en la participación en programas de pago por servicios ambientales. Los resultados muestran que una alta proporción de ciudadanos, mas del 70%, estarían dispuestos a pagar por este tipo de proyectos. El valor de DAP de \$90 debe ser considerado en los análisis costo-beneficio de las acciones que se emprendan en la ZRGHAC.

## CAPÍTULO V. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES GENERALES

Uno de los objetivos de este trabajo fue realizar una valoración del acuífero como ecosistema. La valoración de los servicios ecosistémicos puede ser socio-cultural, ecológica o económica (Brauman *et al.*, 2007; Balvarena *et al.*, 2016), por esta razón se realizó la identificación de 13 servicios brindados por el acuífero de la ZRGHAC intentando abarcar sus características socioculturales y ecológicas. Los servicios ecosistémicos del acuífero descritos en este trabajo representan la interacción entre ecosistemas terrestres y acuáticos que de acuerdo a Balvarena *et al.* (2016), son escasamente estudiados; además coinciden con los mencionados por Batllori-Sampedro (2015) en los Servicios de los ecosistemas para el bienestar humano en Yucatán.

Los SE propuestos son perfectibles y su mantenimiento dependerá de la demanda y oferta de los mismos (Yahdjian *et al.*, 2015). Paralelamente se requiere un gestión integral del agua subterránea que permita a las generaciones futuras disponer del recurso como fuente de agua potable y que al mismo tiempo que la oferta de servicios ecosistémicos del acuífero se mantenga. Villamagna *et al.* (2013) propone que la evaluación de los servicios ecosistémicos sea según la capacidad, la presión ecológica, la demanda y el flujo; para efectos de este trabajo se propone un semáforo que relaciona la calidad del agua con algunos usos actuales de los cenotes de la ZRGHAC y la protección de vida acuática según lo límites permitidos por la NOM-127-SSA1 (1994) modificada, por los Estándares Internacionales de la Organización Mundial de Salud y los Criterios Ecológicos CE-CCA-001/89 (DOF, 1989; WHO, 2007; WHO, 2011).

Diversos estudios sobre calidad de agua elaborados por el CICY, UADY, SEDUMA, Hideyo Noguchi (Pacheco *et al.*, 2002; Hernández-Terrones *et al.*, 2011; SEDUMA, 2015; Polanco-Rodríguez, 2016) reconocen la importancia en mantener la calidad del agua del acuífero de la zona, principalmente para evitar riesgos de salud en la población. Sin embargo no se encontró información sobre estrategias medibles que eviten que la protección de la vida acuática se degrade a excepción del Reglamento de la Ley de Protección al Medio Ambiente del Estado de Yucatán en materia de Cenotes, Cuevas y Grutas, publicado en 2014 (DOF, 2014). Villamagna *et al.* (2015) plantean que este mismo problema ocurre al momento de estudiar los servicios de regulación y sustento ya que es muy complejo crear acciones medibles para preservar o mantener el equilibrio entre

procesos físicos o biogeoquímicos que podemos reconocer en servicios como la depuración de masas de agua o el conducto /transportación de agua de lluvia, la recarga/captación de agua de lluvia, la preservación de biodiversidad y el mantenimiento de la cobertura vegetal. La calidad del agua es un atributo importante para otros servicios ecosistémicos (Brauman *et al.*, 2007) y sirve como indicador para los SE de regulación del acuífero (Villamagna *et al.*, 2013)

Para el cálculo de la valoración económica se utilizó el Método de Valoración Contingente (MVC), el cual ha sido ampliamente utilizado para bienes ambientales que no cuentan con un valor en el mercado (Field, 1995; Kolstad, 2011). El MVC consiste en realizar una serie de preguntas (Brauman *et al.*, 2007) para sondear sobre las preferencias del consumidor integrando el valor ecológico y social, en este caso de los cenotes; para Tudela *et al.*, (2009) éste es uno de los métodos más apropiados para la valoración de un programa de conservación siendo viable la utilización de un modelo econométrico logit para el análisis de sus variables, tal como se realizó en este trabajo.

Los encuestados fueron estudiantes, profesionistas, funcionarios, académicos y activistas. Los resultados reflejan que el 76% de los encuestados están dispuestos a pagar por la preservación y cuidado de los cenotes. Como sociedad se reconoce la importancia de la ZRGHAC y la necesidad de tomar acciones que promuevan el resguardo y preservación del acuífero como ecosistema. Un resultado similar se obtuvo en el documento Saneamiento y Manejo Integral de Cenotes (SEDUMA, 2011) donde el 98.5% de los encuestados considera muy importante o importante la calidad del agua.

También los encuestados identifican con claridad que los cenotes brindan diversos servicios o beneficios a la seres humanos, es decir servicios ecosistémicos; destacando la recarga y captación de agua de lluvia y la preservación de la biodiversidad como los más conocidos y los más importantes según los usuarios. De acuerdo con Bergkamp y Cross (2006) existe una estrecha interdependencia entre los servicios ecosistémicos y el agua subterránea; los servicios ecosistémicos del acuífero de la ZRGHAC y en general de toda la Península de Yucatán no son la excepción. Los SE de agua para riego agrícola y uso pecuario son principalmente identificados por los encuestados que habitan en la ZRGHAC, es decir en zonas rurales. Comprobando que de acuerdo a las necesidades, intereses y conocimiento de cada participante se pueden identificar distintos servicios

ecosistémicos (Yahdjian *et al.*, 2015).

El valor promedio obtenido por las personas que tienen DAP (200 personas de las 262 encuestadas) fue \$90 pesos mensuales. Mientras que en el estudio realizado por la SEDUMA en 2011, se propone la cantidad de \$61 pesos por visita a los cenotes; resultados obtenidos utilizando el Método de Valoración Contingente y el de Costo de viaje.

En este trabajo se presentan algunas estimaciones considerando que el 70% de los hogares que reciben el servicio de agua potable en Mérida participaron, se podría recaudar un monto de \$136,748,604 pesos anualmente para conservación y preservación del acuífero. Adicionalmente a través del Modelo Logit se encontró una relación significativa entre variables independientes como 1) escolaridad, 2) ingreso familiar, 3) número de integrantes, el 4) SE de agua para riego agrícola y el de 5) recarga y captación de agua de lluvia y la DAP como variable dependiente. Las primeras tres variables corresponden al perfil socioeconómico de la población y proporcionan un perfil más específico de las personas con DAP, sin embargo las cuarta y quinta variable son características propias del acuífero que destacan un servicio de provisión y otro de sustento, ambos identificados por los encuestados. Logrando mantener el mayor número de información e identificando aquellas variables con mayor potencial que pudieran utilizarse en un análisis estadístico posterior como lo mencionan Christop *et al.* (2014).

## **Conclusiones finales**

El estudio del acuífero a través de los SE brinda una visión integral y multidisciplinaria que contiene información útil para la toma de decisiones en lo que a gestión del agua se refiere. Los SE identificados en este trabajo son perfectibles y su mantenimiento dependerá de la demanda y oferta de los mismos. Sin embargo, son una herramienta que facilitan la promoción de acciones de preservación y el uso sustentable del agua subterránea.

Aunque la calidad del agua del acuífero y los servicios ecosistémicos que éste brinda están relacionados con los diversos usos que actualmente se le dan a los cenotes; también existen procesos físicos y biogeoquímicos que indirectamente benefician a los usuarios y suelen ser menos valorados. Es en esta clasificación donde se encuentran los SE de regulación y sustento que son esenciales para que el resto de los servicios ecosistémicos puedan manifestarse.

Actualmente la ZRGHAC presenta buenas condiciones de calidad del agua, sin embargo presenta incumplimiento de algunos parámetros principalmente los relacionados con la protección de la vida acuática. Tanto para los servicios de regulación como los de protección de vida acuática es difícil expresar su valor en unidades económicas o biofísicas medibles. Por esta razón resulta difícil su incorporación a planes estratégicos con metas cuantificables. Existen diferencias significativas entre el uso de los cenotes y la calidad del agua de los mismos.

El MVC involucra la opinión de los usuarios de los cenotes, brinda una alternativa de identificación y validación del monto a pagar por parte de la ciudadanía para que sea utilizado en el cuidado y la conservación del acuífero, sin que parezca un monto impuesto de recaudación. Para una gobernanza efectiva es necesario un equilibrio de intereses entre todas las partes, dentro de un marco legal e institucional.

Para efectos de este trabajo se obtuvo una valoración económica a través del Método de Valoración Contingente de \$90 pesos mensuales enfocada a usuarios que habitan en la ciudad de Mérida la cual podría llegar a recaudar mas de \$190 millones de pesos anuales en un escenario muy positivo (100% de usuarios con servicio de agua entubada). A través del análisis econométrico se encontró una relación entre la DAP de los encuestados y su

escolaridad, ingresos mensuales, integrantes de familia y los SE de recarga/captación de agua de lluvia y agua para riego agrícola. Esta información permite identificar las variables con mayor potencial de los usuarios dispuestos a pagar.

Las proyecciones económicas realizadas ponen en evidencia un panorama que podría asegurar una fuente de ingreso para apoyar las acciones establecidas en el Programa de Manejo de la ZRGHAC. El éxito que puede tener una iniciativa que involucre la DAP de los usuarios promueve el uso sustentable del agua, monitorea los niveles de calidad y mantiene los beneficios que hasta ahora brindan los SE del acuífero identificados y otros que pudieran agregarse.

## **Perspectivas**

Considero necesario fomentar el trabajo Interdisciplinario para el estudio de los servicios ecosistémicos que provee el acuífero con expertos en temas de economía ambiental, turismo, ecología, desarrollo sostenible, geología, antropología, biología, química, por mencionar algunas. Adicionalmente reconocer las experiencias ancestrales o empíricas de las personas que aunque no tengan una formación en ciencias pueden complementar o darle sentido a una investigación. Es fundamental el consenso de pensamiento, las aportaciones que se deriven de un grupo de trabajo interdisciplinario serían mucho más integrales y enriquecedores para un tema tan amplio y complejo como lo son los servicios ecosistémicos proporcionados por el acuífero de la Zona de Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes, así como del acuífero de toda la península de Yucatán.

Es necesario generar datos que permitan valorar el acuífero desde una perspectiva medible, que integren una visión interdisciplinaria y a la vez faciliten un monitoreo de los ecosistemas. En el largo plazo estos datos contribuyen a ampliar el alcance del estudio con otros ecosistemas ya sean terrestres, costeros y marinos debido a las interdependencia entre ecosistemas.

El análisis de la calidad del agua de la ZRGHAC si bien se lleva a cabo en algunas instancias como parte de salubridad para la población, es necesario extender este monitoreo a una investigación más integral que proponga nuevos parámetros de medición como la recarga media anual, el uso de bioindicadores de la zona, la integración de

mapeos de distribución espacial, integración obligatoria del cálculo de la huella hídrica o el monitoreo de otros elementos como el fósforo. Por otro lado es necesario atender aquellos sitios que presentan calidad de agua regular y mitigar sus impactos; es necesario identificar el origen de las concentraciones de nutrientes, bacterias o contaminantes al agua subterránea superiores a los límites marcados por la normatividad en vigor, y cuantificar cómo impactan desde el punto de vista económico y sociocultural, qué tratamiento pueden recibir, qué normativa los regula y cuáles son las instituciones que pueden contribuir a este monitoreo.

En un trabajo posterior valdría la pena extender el estudio de la DAP de los usuarios del agua subterránea ampliando la población objetivo. Desde el punto de vista de la economía ambiental se podría realizar una segmentación de usuarios y aplicar una encuesta probabilística para cada segmento la cuál podría brindar información mucho más específica de usuarios con distintas características: turistas, visitantes, agricultores, ganaderos, habitantes de la zona urbana, empresarios, etc. y al mismo tiempo hacer una relación con variables socio culturales como la corrupción, transparencia, usos de la tierra, formas de organización, percepción a la escasez del recurso, variables socioeconómicas, entre otras que expliquen a mayor profundidad la DAP.

Desde una perspectiva estratégica y de gestión proponer a instituciones tanto públicas como privadas integren en sus líneas de acción prioritaria el financiamiento de proyectos relacionados con la valoración integral del acuífero. Dar a conocer y sensibilizar a la sociedad en general en el uso sustentable del agua y proponer planes de manejo enfocados a zonas prioritarias como la zona de Reserva, proyectos que permitan expandir la conservación y preservación de diversos ecosistemas y no sólo de un área delimitada geográficamente.

## REFERENCIAS

- Alba, P.M. (2014). Fray Diego de Landa o la misión en negativo. Un caso de literatura misionera. In-Traduções Revista do Programa de Pós-Graduação em Estudos da Tradução da UFSC, 6, 101-120.
- APHA, (2012). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association & Water Environment Federation. (EW Rice, RB Baird, AD Eaton, & LS Clesceri, Ed.) (22nd ed.). Washington.
- Arriaga, L. (2009). Implicaciones del cambio de uso de suelo en la biodiversidad de los matorrales xerófilos: un enfoque multiescalar. *Investigación Ambiental* 1 (1):6-16.
- Ayora-Domínguez, M. E. (2014). Caracterización del agua en cenotes localizados en dos zonas del anillo de cenotes. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Yucatán. 104 p.
- Balvanera, P., Arias-González J.E., Rodríguez-Estrella, R., Almeida-Leñero, L., Schmitter-Soto, J.J. (2016). Una mirada al conocimiento de los ecosistemas de México. Ciudad de México, Universidad Nacional Autónoma de México, 441 pp.
- Balvanera, P., y Cotler, H. (2007). Los servicios ecosistémicos y la toma de decisiones: retos y perspectivas. *Gaceta Ecológica*, (84-85), 117-123.
- Barbier, E. B., Hacker, S. D., Kennedy, C., Koch, E. W., Stier, A. C., y Silliman, B. R. (2011). The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, 81(2), 169-193.
- Bartlett, J.E., Kotrlik, J.W., Higgins, C.C. 2001. Organizational Research: Determining Appropriate Sample Size in Survey Research. *Information Technology, Learning and Performance Journal*, 19 (1), 43-50.
- Bateman, I., Carson, R., Day, B., Hanemam, M., Hanley, N., Hett, T., Jones-Lee, M., Loomes, G., Mourato, S., Ozdemiroglu, E., Pearce, D., Sugden, R., Swanson, J. (2002). *Economic Valuation with Stated Preference Techniques a Manual*. Edward Elgar Publishing Limited. UK. 89-247 pp.
- Batllore-Sampedro, E. (2015). Servicios de los Ecosistemas para el Bienestar Humano. Información proporcionada por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente del Estado de Yucatán. 1-36 pp
- Batllore-Sampedro, E., González-Piedra, J. I., Díaz-Sosa, J., Febles-Patrón, J.L. (2006). Caracterización hidrológica de la región costera noroccidental del estado de

- Yucatán, México en *Investigaciones Geográficas*, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM Núm 59, 2006, pp. 74-92.
- Bauer-Gottwein, P., Gondwe, B. R., Charvet, G., Marín, L. E., Rebolledo-Vieyra, M., y Merediz-Alonso, G. (2011). Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 19(3), 507-524.
- Beddows, P., Blanchon P., Escobar E., Torres-Talamante O. (2007), "Los cenotes de la península de Yucatán", *Revista Arqueología Mexicana*, No. 83, 1-4.
- Bennett, E., Peterson, G., Gordon, L. (2009). Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters* 12, 1-11.
- Bergkamp, G., y Cross, K. (2006). Groundwater and ecosystem services: towards their sustainable use. In *Proceedings of the international symposium on groundwater sustainability (ISGWAS)*, Alicante, España, 24-27.
- Birol, E., Karousakis, K., Koundouri, P. (2006). Using economic valuation techniques to inform water resources management: A survey and critical appraisal of available techniques and an application. *Science of the Total Environment*, 365(1-3), 105–122.
- Boyd, J., y Banzhaf, S. (2007). What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics*, 63(2), 616-626.
- Brady, J. E., y Villarejo, J. L. B. (1993). Las cavernas en la geografía sagrada de los mayas. En: *Perspectivas antropológicas en el mundo maya*. Sociedad Española de Estudios Mayas, 75-96.
- Brauman, K.A., Daily, G.C., Duarte, T.K.E., Mooney, H.A. (2007). The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services. *Annual Review of Environment and Resources*, 32, 67-98.
- Bringas, N.L., González, J.I.I. (2014). El turismo alternativo: una opción para el desarrollo local en dos comunidades indígenas de Baja California. *Economía Sociedad y territorio*, 551-589.
- Burneo, S. (2009). Megadiversidad. *Letras verdes* 3, Flacso Ecuador. Editorial Dossier. Ecuador, 6-7.
- Carballo, A. (2005). Analisis de un Modelo de Desarrollo Ecoturístico en Quintana Roo, México. *Teoría Y Praxis*, 1, 31-47.
- Carpenter, S.R. y C. Folke. (2006). Ecology for Transformation. *Trends in Ecology and Evolution* 21, 309-315.

- Carpenter, S.R., y Biggs, R., (2009) Freshwaters: managing Across Scales in Space and Time in: Chapin III, F.S., Kofinas, G.P., Folke, C. (2009). Principles of ecosystem stewardship. Nueva York, Springer, 407 pp.
- Ceballos, H. (1998). Ecoturismo :naturaleza y desarrollo sostenible . (Diana, Ed.) México. Retrieved from <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=AGRIUAN.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expression=mfn=004317>
- CGER, (1997) Commission on Geosciences, Environment and Resources Value Ground Water. Economic concepts and approaches. Recuperado en: <https://www.nap.edu/read/5498/chapter/1#ii>
- Chan, K.M., Guerry, A.D., Balvanera, P., Klain, S., Satterfield, T., Basurto, X., Bostrom, A., Chuenpagdee, R., Gould, R., Halpern, B., Hannahs, N., Levine J., Norton, B., Ruckelshaus, M., Russell, R., Tam, J. Woodside, U. (2012). Where are cultural and social in ecosystem services? A framework for constructive engagement. *BioScience*, 62(8), 744-756.
- Chapin III, F.S., Matson, P.A., Vitousek, P.M. (2011). Principles of terrestrial ecosystem ecology. 2a ed. Nueva York, Springer, 529 pp.
- Christensen, N. L. et al. (1996). The report of the Ecological Society of America committee on the scientific basis for ecosystem management. *Ecological applications*, 6(3), 665-691.
- Christop-Neitzel, K., Caro-Borrero, A., Revollo-Fernandez, D., Aguilar-Ibarra A., Ramos, A. Y Almeida-Leñero, L. (2014). Paying for environmental services: Determining recognized participation under common property in a peri-urban context. *Forest Policy and Economics* 38. 46-55.
- Clarke, KR, Gorley, RN, 2006. PRIMER v6: User Manual/Tutorial. PRIMER-E, Plymouth, 192pp.
- Cochran, W. G. (1977). Sampling techniques (3rd ed.). New York: John Wiley & Sons.
- CONABIO. (2009). Capital natural de México, vol II, Estado de conservación y tendencias de cambio, México, Vol II, 821 pp.
- CONAGUA. (2015). Estadísticas del Agua en México edición 2014. México, D.F., México: Coordinación General de Comunicación y Cultura del Agua, CONAGUA, 11-35.
- CONAGUA. (2014). Estadísticas del Agua en México edición 2014. México, D.F., México: Coordinación General de Comunicación y Cultura del Agua, 238 pp.

- CONAGUA. (2012). Programa Hídrico Regional Visión 2030. Región Hidrológico-Administrativa XII Península de Yucatán. Coordinación General de Comunicación y Cultura del Agua, CONAGUA.
- CONAGUA (2010). Estadísticas del Agua en México edición 2010. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, 193 pp.
- CONAPO. (2010). Índice de marginación por localidad 2010. Secretaría de Gobernación. [http://www.conapo.gob.mx/en/CONAPO/Indice\\_de\\_Marginacion\\_por\\_Localidad\\_2010](http://www.conapo.gob.mx/en/CONAPO/Indice_de_Marginacion_por_Localidad_2010)
- COTASMEY. (2015). Características Socioeconómicas y Manejo del agua en la Reserva Estatal Geohidrológica Anillo de Cenotes. Mérida. COTASMEY-SEDUMA. 60 pp.
- Daily, G. C., Soderqvist, T., Aniyar, S., Arrow, K., Dasgupta, P., Ehrlich, P. R., Folke, C., Jansson, A., Jansson, B., Kautsky, N., Levin, S., Lubchenco, J., Mäler, K.G., Simpson, D., Starrett, D., Tilman, D., Walker, B. (2000). The Value of Nature and the Nature of Value. *Science*, 289(5478), 395-396.
- Daily, G.C. (1997). *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington, DC: Island. 392 pp.
- De la Vega, F. (2016). Turismo de naturaleza atrae 6.4 millones de visitantes. Diario de Yucatán. Recuperado de: <http://yucatan.com.mx/mexico/turismo-mexico/turismo-naturaleza-atrae-6-4-millones-visitantes>
- De Marsily, G.D. (1992). Creation of "Hydrogeological Nature Reserves": a plea for the defense of Groundwater. *Groundwater*, 30(5), 658-659.
- DOF. (17 de junio de 2014) Reglamento de la Ley de Protección al Medio Ambiente del Estado de Yucatán en materia de Cenotes , Cuevas y Grutas. 1-13pp
- DOF. (28 de octubre de 2013). Decreto que establece el Area Natural Protegida denominada Reserva Estatal Geohidrológica Anillo de Cenotes. Mérida, Yucatán, México. 1-24 pp.
- DOF. (13 de diciembre de 1989). Criterios Ecológicos de Calidad del Agua. Comisión Nacional del Agua—Subdirección General de Administración del Agua, 1-64 pp
- Domínguez, J., Vences, A., Murillo, D., Montoya J. (2012). Hacia un posicionamiento de gobernanza del agua en México. COLMEX-CONAGUA-IMTA-ANEAS, 105 pp.
- Escolero, O., Marin, L., Steinich, B., Pacheco, J. (2000). Delimitation of a hydrogeological reserve for a city within a karstic aquifer: the Merida, Yucatan example. *Landscape and Urban Planning*. 51, 53-56.

- Escolero, O., Marín, L., Steinich, B., Pacheco, J., Cabrera, A., Alcocer, J. (2002). Development of a protection strategy of karst limestone aquifers: The Merida Yucatan case study. *Water Resources Management*, 16 (5) 351-367.
- Escolero, O., Marin, L.E., Steinich, B., Pacheco, J.A., Molina M., Anzaldo. J.M. (2005). Geochemistry of the hydrogeological reserve of Merida Yucatan, Mexico. *Geofísica Internacional*. 44 (3) 301-314.
- Falkenmark, M., & Rockström, J. (2004). *Balancing Water for Humans and Nature: The New Approach in Ecohydrology*. Earthscan, London.
- Field, B. (1995). *Economía ambiental, Una Introducción*. Mc Graw Hill Interamericana S.A. Colombia. 173-181.
- Flores-Verdugo, F., Moreno, P., Agraz, C., López, H., Benítez, D., Travieso A., (2007). La topografía y el hidropereodo: dos factores que condicionan la restauración de los humedales costeros. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, (80), 33-47.
- Ford, D., Williams, P. (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*, England. John Wiley & Sons, Ltd. 339 pp.
- García, A., Jouault, S., Gonzalez, M. (2015). *Atlas de Turismo Alternativo en la Península de Yucatán*. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IP- Unidad Mérida -Facultad de Ciencias Antropológicas-Universidad Autónoma de Yucatán. 170 pp.
- Gondwe, B.R.N., Lerer, S., Stisen, S., Marín, L., Rebolledo-Veyra, M., Merediz-Alonso, G., Bauer-Gottwein, P. (2010). Hydrogeology of the south-eastern Yucatán Península: new insights from water level measurements, geochemistry, geophysics and remote sensing. *J Hydrol*, 507-524.
- Gujarati, D. (1997). *Econometría*. Mc Graw Hill. (Traducido por Gladys Arango Medina) 3ª ed. Colombia. 543-552.
- Hernández-Stefanoni, J., Dupuy, J., Johnson, K., Birdsey, R., Tun-Dzul, F., Peduzzi, A., Caamal-Sosa J., Sánchez-Santos, G. Y López-Merlín, D. (2014). Improving species diversity and biomass estimates of tropical dry forests using airborne LiDAR. *Remote Sensing*, 6(6), 4741-4763.
- Hernández-Terrones, L., Rebolledo\_Vieyra, M., Almazán B., Valadez F. (2011). Reporte final Proyecto FOMIX-YUC-2008-C06108977. Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C. Unidad de Ciencias del Agua. 128pp.
- Hoevenagel, R., y van der Linden, J. W. (1993) Effects of differing descriptions of the ecological good on willingness to pay values. *Ecol. Econ.* 7, 223-238.

- International Organization for Standardization (2014). ISO 14046: Environmental management-Water footprint-Principles, requirements and guidelines. Ginebra, Suiza: ISO.
- Irola-Sansores, E., Almazán-Becerril, A., Hernández-Terrones, L., Ortega-Camacho, D., Escobar-Morales, S., Delgado-Pech, B. (2013). Limitación por fósforo de la biomasa fitoplanctónica en cenotes de la Península de Yucatán. Golfo de México. Contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias. UAC, UNAM-ICMYL, CINVESTAV-Unidad Mérida. P.51-64.
- INEGI (2015). Censo de Población y Vivienda 2010. Recuperado en: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2010/>
- INEGI (2015). Panorama Sociodemográfico de México 2015. Yucatán. Encuesta Intercensal. Recuperado 20 de octubre de 2016 en: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/Panorama2015/Web/Contenido.aspx#Yucat%C3%A1n31000>.
- INEGI (2012). Anuario estadístico de Yucatán. Instituto Nacional de Estadística y Geografía y Gobierno del Estado de Yucatán. 140-145 p.
- INEGI. (2010). Principales resultados del Censo de Población y Vivienda 2010.Yucatán. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2010/>
- Kolstad, C. (2011). Environmental Economics 2° edición. Oxford University Press Inc. Nueva York. 200-209.
- Landa, Fray Diego de (1982) Relación de las cosas de Yucatán escrito en 1566. Introducción de Angel María Garib. Editorial Porrúa, S. A. México.
- Maass, M. (2016). Prólogo. En: Balvanera, Patricia, Jesús Ernesto Arias-González, Ricardo, Rodríguez-Estrella, Lucía Almeida-Leñero, Juan J. Schmitter-Soto (eds). Una mirada al conocimiento de los ecosistemas de México. Ciudad de México, Universidad Nacional Autónoma de México, 10.
- Magnuson, J. J., Kratz, T. K., Benson, B. J. editors. (2006). *Long-Term Dynamics of Lakes in the Landscape*. Oxford University Press, London.
- Mandujano, F. (1998). Teoría del muestreo: particularidades del diseño muestral en estudios de la conducta social. Revista Electrónica de Metodología Aplicada. Vol. 3 No1. Chile. Recuperado de: <http://www3.uniovi.es/~Psi/REMA/v3n1/a1v3n1.wp5>
- Martínez, M., Dimas, L. (2007). Valoración económica de los servicios hidrológicos: Subcuenca del Río Teculután, Guatemala. WWF, 53 pp.

- Medina, A. (2008). Cenotes, Imprints of water and light in the jungle Yucatan Peninsula, Mexico. 167 pp.
- Mendelsohn, R., Olmstead, S. (2009). The Economic Valuation of Environmental Amenities and Disamenities Methods and Applications. *Annual Review of Environment and Resources*. 34, 325-347
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystem and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington DC. 1-155 pp.
- Mooney, H. A., Ehrlich, P. R. (1997). Ecosystem services: A fragmentary history. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*, ed Daily G (Island Press, Washington, DC), 11–19.
- NOM 127 SSA1-1994. Norma Oficial Mexicana Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización, 1-71.
- Odum, E.P., Odum, H.T., Andrews, J. (1971). *Fundamentals of ecology*. Filadelfia, Saunders. 17pp.
- ONU (2005). Decenio Internacional para la Acción "El agua fuente de vida" 2005-2015. Recuperado el 23 de mayo de 2015, de, El derecho humano al agua y al saneamiento : [http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/pdf/human\\_right\\_to\\_water\\_and\\_sanitation\\_media\\_brief\\_spa.pdf](http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/pdf/human_right_to_water_and_sanitation_media_brief_spa.pdf)
- Pacheco, J., Calderón, L., Cabrera, A. (2004). Delineación de la zona de protección hidrogeológica para el campo de pozos de la planta Mérida I, en la ciudad de Mérida, Yucatán, México. *Ingeniería* 8, 7-16.
- Pacheco-Avila, J., Cabrera-Sansores, A., Calderón-Rocher, L., Marín, L., Steinich, B., & Escolero, O. (2002). Delineación de una zona de protección para el abastecimiento de agua en Mérida, Yucatán, México. En Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales, FEMISCA, 13, 1-11.
- Pearce, D. (1992). Alternative Tourism: Concepts, Classifications, and Questions, en Smith y Eadington (eds.); *Tourism Alternatives. Potentials and Problems in the Development of Tourism*, University of Pennsylvania Press, Philadelphia, EUA, 15-18.
- Perni, A., Martínez-Paz, J.M. (2012). Valoración Económica de los beneficios ambientales de la recuperación del río Segura (España). *Semestre Económico*, 15(32), 15-40.

- Polanco-Rodríguez, A.G., (2016). Evaluación de la contaminación del agua y de biomarcadores humanos, por el uso de plaguicidas organoclorados en Yucatán, México. Tesis de Doctorado Universidad de Cádiz.
- Polasky, S., y Segerson, K. (2009). Integrating Ecology and Economics in the Study of Ecosystem Services: Some Lessons Learned. *The Annual Review of Resource Economics*, 1, 409-434.
- Price, M. (2011). Agua subterránea. Editorial Limusa. México, 3-11
- RAMSAR. (2010) Ficha informativa de los Humedales Ramsar-Anillo de Cenotes, 17 pp. [http://ramsar.conanp.gob.mx/docs/sitios/FIR\\_RAMSAR/Yucatan/Anillo%20de%20Cenotes/FIR%20Anillo%20de%20Cenotes\\_Rev4\(Agosto2011\).doc](http://ramsar.conanp.gob.mx/docs/sitios/FIR_RAMSAR/Yucatan/Anillo%20de%20Cenotes/FIR%20Anillo%20de%20Cenotes_Rev4(Agosto2011).doc)
- Riera, P. (1994). Manual de Valoración Contingente. Instituto de Estudios Fiscales, España, 112 pp.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin III, F.S., Lambin, E.F., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H.J., Nykvist, B., de Wit, C.A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B.H., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P., y Foley, J.A.. (2009). A Safe Operating Space for Humanity. *Nature* 461, 472-475.
- Rockström, J., Gordon, L., Folke, C., Falkenmark, M. Engwall, M. (1999). Linkages among water vapor flows, food production, and terrestrial ecosystem services. *Conservation Ecology* 3:5. <http://www.consecol.org/vol3/iss2/art5/>.
- Randall, A., Berry, I., y Eastman, C. (1974). Bidding Games for Valuation of Aesthetic Environmental Improvements. *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 1, 132-149.
- Rodríguez-Estrella, R., Benítez, J., de Gortari, E. Santos, G. (2016). Impacto de las actividades humanas en la biodiversidad y en los ecosistemas. Capítulo 2. En: Balvanera, Patricia, Jesús Ernesto Arias-González, Ricardo, Rodríguez-Estrella, Lucía Almeida-Leñero, Juan J. Schmitter-Soto (eds). 2016. Una mirada al conocimiento de los ecosistemas de México. Ciudad de México, Universidad Nacional Autónoma de México, 60 pp.
- Sánchez-Ahuactzin, T., Ortega-Camacho, D., Rebolledo-Vieyra, M., Escobar-Morales, S., Hernández-Terrones, L., (sometido 2016). The hydrogeochemical processes in a karst aquifer (The sinkholes ring, Southeast Mexico).

- Sarukhán, J., et al. (2012). Capital natural de México: Acciones estratégicas para su valoración, preservación y recuperación. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. 5-9.
- Schmitter-Soto, J. J., Ruiz-Cauich, L. E., Herrera, R. L., y González-Solís, D. (2011). An index of biotic integrity for shallow streams of the Hondo River basin, Yucatan Peninsula. *Science of the Total Environment*, 409(4), 844-852.
- SEDUMA, (2016). Rutas turísticas del Estado de Yucatán. Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente.
- SEDUMA (2015) Programa Milpa. Estrategia para el Desarrollo de las Comunidades Mayas en el Estado de Yucatán. Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente.
- SEDUMA, (2015) Calidad del Agua y límites permisibles por la NOM-127-SSA1-1994 en la Reserva Hidrogeológica para el abastecimiento de agua con calidad para la zona metropolitana de Mérida, Yucatán. Universidad Autónoma de Yucatán. FOMIX Clave 108520. 1-32.
- SEDUMA, (2015). Actividades agropecuarias, económicas y turísticas en los municipios de Acanceh, Cuzamá, Hocabá, Hochtún, Homún, Huhí, Sanahcat, Seyé, Tahmek, Tecoh, Tekit, Timucuy, Xocchel. Proyecto Distrito 14. Secretaria de Fomento Económico, Secretaria de Fomento Agrario y Pesquero, Secretaria de Turismo
- SEDUMA, (2012). Formación y tipo de cenotes. <http://www.seduma.yucatan.gob.mx/cenotes-grutas/introduccion.php>
- SEDUMA, (2011). Saneamiento y Manejo Integral de Cenotes del Anexo 31 del Presupuesto de Egresos de la Federación del ejercicio fiscal 2011. <http://www.seduma.yucatan.gob.mx/cenotes-grutas/proyecto-saneamiento-cenotes.php>
- Schmitter-Soto, J. J. (2006). Evaluación del riesgo de extinción de los cíclidos mexicanos y de los peces de la frontera sur incluidos en la NOM- 059. El Colegio de la Frontera Sur. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. CK001. México D. F.
- Schmitter Soto, J. J., Briones, E., Alcocer, E., Morales, J. S., Gutiérrez, E. E., Marín, M. (2001). Los Cenotes de la Península de Yucatán. *Lagos y presas de México*. p. 323-336.
- Scholes, F. V., y Adams, E. B. (1938). Don Diego Quijada, alcalde mayor de Yucatán, Ed. Porrúa e hijos. Vol. 14, 1561-1565.

- Smith, V., Eadington, W. (1992). *Tourism Alternatives. Potentials and Problems in the Development of Tourism*, University of Pennsylvania Press, Philadelphia, EUA.
- Steinich, B., y Marín, L. (1996). Hidrogeological investigations in northeastern Yucatán, México, using resistivity surveys. *Groundwater* 34(4), 640-646.
- Torres Díaz, M. C., Basurto-Solís, Y. Y., Cortés-Esquivel, J., García-Uitz, K., Koh-Sosa, Á., Puerto-Romero, F., Pacheco-Ávila, J. G. (2014). Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo de contaminación del agua subterránea en Yucatán. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 1(3), 189-203.
- Tudela, M., J., Martínez-Damián, M., Valdivia-Alcalá, R., Portillo-Vázquez, M., Romo-Lozano, J. (2009). Modelos de elección discreta en la valoración económica de áreas naturales protegidas. *Revista Mexicana de Ecología Agricultura y de los Recursos Naturales*. Vol. 2 (3), 7-29.
- Villamagna A., Angermeier P., y Bennett E. (2013). Capacity, pressure, demand, and flow: A conceptual framework for analyzing ecosystem service provision and delivery. *Ecological Complexity*. 15, 114-121.
- Villarejo, J. L. B., y Klemm, C. M. (1992). Traducción y comentarios al artículo de J. Eric Thompson" The role of caves in maya culture". *Boletín americanista*, (42-43), 395-424.
- Villarejo, J. L. B., y Sánchez, I. (1991). Las cavernas de municipio de Oxkutzcab, Yucatán, México: nuevas aportaciones. *Mayab*, (7), 36-52.
- Villasuso, M. J. (2007). Informe Final Estudio Geohidrológico Predio Excellence, Quintana Roo, México. Consultores en Agua Potable, Alcantarillado, Geohidrología & Hidráulica Costera, I.C., Cancún, México.
- Weisberg, H. (2005). *The Total Survey Error Approach*. Chicago, University of Chicago Press, 400p.
- WHO (2011). *Guidelines for drinking water Quality*. WHO Library Cataloguing in Publication Data (4th ed.) 148-153.
- WHO (2007). *Chemical safety of drinking water: Assessing priorities for risk management*. World Health Organization. 160 pp.
- WHO (2003) *El derecho humano al agua*. Programa de la ONU para la prevención y la comunicación en el marco del decenio (UNW-DPAC). Recuperado en: [http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/pdf/facts\\_and\\_figures\\_human\\_right\\_to\\_water\\_spa.pdf](http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/pdf/facts_and_figures_human_right_to_water_spa.pdf)

- Worthington, S., Ford, D., Beddows, P. (2001). Porosity and Permeability Enhancement in Unconfined Aquifers as a Result of Dissolution. Trabajo presentado en 13th International Congress of Speleology, 4th Speleological Congress of Latin America and Caribbean, 26th Brazilian Congress of Speleology. Speleo Brazil.
- Yahdjian, L., Sala, O. Y., Havstad, K. (2015). Rangeland ecosystem services: shifting focus from supply to reconciling supply and demand. *The Ecological Society of America*.13(1), 44-51.

## ANEXOS

Cumplimiento de la normativa en relación a la calidad de agua de los cenotes muestreados en 2015 y 2016.

Kalcuch	Resultados		Uso del agua para diferentes actividades humanas														Indicador Muestra 1	Indicador Muestra 2
	Muestréos		Agua Potable				CE-CCA-001/89 SEMARNAT											
	1	2	N.O.M-127-SSA1(1994) modif 2000		O.M.S International Standards		Fuente Abastecimiento de Agua Potable		Recreativo c/contacto primario		Riego agrícola		Pecuario		Protección vida acuática (agua dulce)			
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2			
Sulfatos (mg/L)	16.060	26.850	400	400			500	500			130	130			0.005	0.005		
Cloruros (mg/L)	107.6	131.3	250	250	250	250	250	250			148	148			250	250		
Nitratos (mg/L)	13.890	20.284	10	10	50	50	5	5					90	90				
Nitritos (mg/L)	<LDM	<LDM	0.05	0.05	3-0.2	3-0.2	0.05	0.05					10	10				
Amonio (mg/L)	0.09	0.11	0.5	0.5											0.06	0.06		
Fosfatos (mg/L)	<LDM	<LDM					0.1	0.1							0.025	0.025		
Alcalinidad (mg/L)	386	446	500	500	500	500	400	400										
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	<1.0	<1.0	Aus	Aus	Aus	Aus	1000	1000	200	200	1000	1000			200	200		
Coliformes totales (NMP/100ml)	1011.2	4	Aus	Aus	Aus	Aus												
Temperatura (°C)	25.92	25.95					Condiciones naturales +2,5				Condiciones nat +1.6							
SDT	1553	890	1000	1000	1000	1000	1000	1000										
pH	7.18	7.16	6.5-8.5	6.5-8.5	6.5-8.6	6.5-8.6	5-9	5-9			4.5-9.04.5-9.0							
OD (mg/L)	4.24	5.77					4	4							5	5		

Nohomozón	Resultados		Uso del agua para diferentes actividades humanas														Indicador Muestra 1	Indicador Muestra 2
	Muestréos		Agua Potable				CE-CCA-001/89 SEMARNAT											
	1	2	N.O.M-127-SSA1(1994) modif 2000		O.M.S International Standards		Fuente Abastecimiento de Agua Potable		Recreativo c/contacto primario		Riego agrícola		Pecuario		Protección vida acuática (agua dulce)			
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2			
Sulfatos (mg/L)	17.720	10.830	400	400			500	500			130	130			0.005	0.005		
Cloruros (mg/L)	109.9	134.7	250	250	250	250	250	250			148	148			250	250		
Nitratos (mg/L)	36.740	11.350	10	10	50	50	5	5					90	90				
Nitritos (mg/L)	<LDM	<LDM	0.05	0.05	3-0.2	3-0.2	0.05	0.05					10	10				
Amonio (mg/L)	0.11	0.30	0.5	0.5											0.06	0.06		
Fosfatos (mg/L)	<LDM	<LDM					0.1	0.1							0.025	0.025		
Alcalinidad (mg/L)	201	289	500	500	500	500	400	400										
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	<1.0	ND	Aus	ND	Aus	ND	1000	1000	200	200	1000	1000			200	200		ND
Coliformes totales (NMP/100ml)	1011.2	ND	Aus	ND	Aus	ND												ND
Temperatura (°C)	26.30	25.57					Condiciones naturales +2,5				Condiciones nat +1.6							
SDT	1533	1090	1000	1000	1000	1000	1000	1000										
pH	7.34	7.46	6.5-8.5	6.5-8.5	6.5-8.6	6.5-8.6	5-9	5-9			4.5-9.04.5-9.0							
OD (mg/L)	4.55	6.90					4	4							5	5		

Bekal	Resultados		Uso del agua para diferentes actividades humanas														Indicador Muestra 1	Indicador Muestra 2
	Muestreros		Agua Potable				CE-CCA-001/89 SEMARNAT											
	1	2	N.O.M-127-SSA1(1994) modif 2000	O.M.S International Standards		Fuente Abastecimiento de Agua Potable		Recreativo c/contacto primario		Riego agrícola		Pecuario		Protección vida acuática (agua dulce)				
				1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2			
Sulfatos (mg/L)	15.726	28.284	400	400			500	500			130	130			0.005	0.005		
Cloruros (mg/L)	58.78	76.037	250	250	250	250	250	250			148	148			250	250		
Nitratos (mg/L)	14.318	14.444	10	10	50	50	5	5					90	90				
Nitritos (mg/L)	<LDM	<LDM	0.05	0.05	3-0.2	3-0.2	0.05	0.05					10	10				
Amonio (mg/L)	0.24	0.26	0.5	0.5											0.06	0.06		
Fosfatos (mg/L)	<LDM	<LDM					0.1	0.1							0.025	0.025		
Alcalinidad (mg/L)	240	488	500	500	500	500	400	400										
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	<1.0	<1.0	Aus	Aus	Aus	Aus	1000	1000	200	200	1000	1000			200	200		
Coliformes totales (NMP/100ml)	1011.2	173.3	Aus	Aus	Aus	Aus												
Temperatura (°C)	26.94	26.67					Condiciones naturales +2,5				Condiciones nat +1,6							
SDT	1242	790	1000	1000	1000	1000	1000	1000										
pH	7.12	7.20	6.5-8.5	6.5-8.5	6.5-8.6	6.5-8.6	5-9	5-9			4.5-9.0,4.5-9.0							
OD (mg/L)	5.05	4.11					4	4							5	5		

Subinché	Resultados		Uso del agua para diferentes actividades humanas														Indicador Muestra 1	Indicador Muestra 2
	Muestreros		Agua Potable				CE-CCA-001/89 SEMARNAT											
	1	2	N.O.M-127-SSA1(1994) modif 2000	O.M.S International Standards		Fuente Abastecimiento de Agua Potable		Recreativo c/contacto primario		Riego agrícola		Pecuario		Protección vida acuática (agua dulce)				
				1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2			
Sulfatos (mg/L)	15.642	27.701	400	400			500	500			130	130			0.005	0.005		
Cloruros (mg/L)	65.06	68.249	250	250	250	250	250	250			148	148			250	250		
Nitratos (mg/L)	15.705	17.306	10	10	50	50	5	5					90	90				
Nitritos (mg/L)	<LDM	<LDM	0.05	0.05	3-0.2	3-0.2	0.05	0.05					10	10				
Amonio (mg/L)	0.18	0.11	0.5	0.5											0.06	0.06		
Fosfatos (mg/L)	<LDM	<LDM					0.1	0.1							0.025	0.025		
Alcalinidad (mg/L)	440	506	500	500	500	500	400	400										
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	<1.0	<1.0	Aus	Aus	Aus	Aus	1000	1000	200	200	1000	1000			200	200		
Coliformes totales (NMP/100ml)	1011.2	1011.2	Aus	Aus	Aus	Aus												
Temperatura (°C)	26.83	26.72					Condiciones naturales +2,5				Condiciones nat +1,6							
SDT	1300	780	1000	1000	1000	1000	1000	1000										
pH	6.90	7.46	6.5-8.5	6.5-8.5	6.5-8.6	6.5-8.6	5-9	5-9			4.5-9.0,4.5-9.0							
OD (mg/L)	3.89	5.16					4	4							5	5		

Utzil	Resultados		Uso del agua para diferentes actividades humanas														Indicador Muestra 1	Indicador Muestra 2
	Muestreros		Agua Potable				CE-CCA-001/89 SEMARNAT											
	1	2	N.O.M-127-SSA1(1994) modif 2000	O.M.S International Standards		Fuente Abastecimiento de Agua Potable		Recreativo c/contacto primario		Riego agrícola		Pecuario		Protección vida acuática (agua dulce)				
				1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2			
Sulfatos (mg/L)	15.726	28.284	400	400			500	500			130	130			0.005	0.005		
Cloruros (mg/L)	58.78	76.037	250	250	250	250	250	250			148	148			250	250		
Nitratos (mg/L)	14.318	14.444	10	10	50	50	5	5					90	90				
Nitritos (mg/L)	<LDM	<LDM	0.05	0.05	3-0.2	3-0.2	0.05	0.05					10	10				
Amonio (mg/L)	0.24	0.26	0.5	0.5											0.06	0.06		
Fosfatos (mg/L)	<LDM	<LDM					0.1	0.1							0.025	0.025		
Alcalinidad (mg/L)	240	488	500	500	500	500	400	400										
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	<1.0	<1.0	Aus	Aus	Aus	Aus	1000	1000	200	200	1000	1000			200	200		
Coliformes totales (NMP/100ml)	1011.2	173.3	Aus	Aus	Aus	Aus												
Temperatura (°C)	26.94	26.67					Condiciones naturales +2,5				Condiciones nat +1,6							
SDT	1242	790	1000	1000	1000	1000	1000	1000										
pH	7.12	7.20	6.5-8.5	6.5-8.5	6.5-8.6	6.5-8.6	5-9	5-9			4.5-9.0,4.5-9.0							
OD (mg/L)	5.05	4.11					4	4							5	5		

Xpacay (Teabo)	Resultados		Uso del agua para diferentes actividades humanas														Indicador Muestra 1	Indicador Muestra 2
	Muestreos		Agua Potable				CE-CCA-001/89 SEMARNAT											
	1	2	N.O.M-127-SSA1(1994) modif 2000		O.M.S International Standards		Fuente Abastecimiento de Agua		Recreativo c/contacto primario		Riego agrícola		Pecuario		Protección vida acuática (agua dulce)			
			1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2		
Sulfatos (mg/L)	46.570	16.610	400	400			500	500			130	130			0.005	0.005		
Cloruros (mg/L)	101.5	110.3	250	250	250	250	250	250			148	148			250	250		
Nitratos (mg/L)	15.870	7.170	10	10	50	50	5	5					90	90				
Nitritos (mg/L)	<LDM	<LDM	0.05	0.05	3-0.2	3-0.2	0.05	0.05					10	10				
Amonio (mg/L)	0.13	0.09	0.5	0.5											0.06	0.06		
Fosfatos (mg/L)	<LDM	<LDM					0.1	0.1							0.025	0.025		
Alcalinidad (mg/L)	367	184	500	500	500	500	400	400										
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	<1.0	ND	Aus	ND	Aus	ND	1000	ND	200	ND	1000	ND			200	200		ND
Coliformes totales (NMP/100ml)	1011	ND	Aus	ND	Aus	ND												ND
Temperatura (°C)	27.03	26.84					Condiciones naturales +2,5				Condiciones nat +1,6							
SDT	1420	1080	1000	1000	1000	1000	1000	1000										
pH	6.89	7.33	6.5-8.5	6.5-8.5	6.5-8.6	6.5-8.6	5-9	5-9			4.5-9.0	4.5-9.0						
OD (mg/L)	4.39	6.08					4	4							5	5		

Santa Cruz	Resultados		Uso del agua para diferentes actividades humanas														Indicador Muestra 1	Indicador Muestra 2
	Muestreos		Agua Potable				CE-CCA-001/89 SEMARNAT											
	1	2	N.O.M-127-SSA1(1994) modif 2000		O.M.S International Standards		Fuente Abastecimiento de Agua		Recreativo c/contacto primario		Riego agrícola		Pecuario		Protección vida acuática (agua dulce)			
			1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2		
Sulfatos (mg/L)	5.992	14.627	400	400			500	500			130	130			0.005	0.005		
Cloruros (mg/L)	21.01	46.194	250	250	250	250	250	250			148	148			250	250		
Nitratos (mg/L)	14.089	14.579	10	10	50	50	5	5					90	90				
Nitritos (mg/L)	<LDM	<LDM	0.05	0.05	3-0.2	3-0.2	0.05	0.05					10	10				
Amonio (mg/L)	0.3	0.19	0.5	0.5											0.06	0.06		
Fosfatos (mg/L)	<LDM	<LDM					0.1	0.1							0.025	0.025		
Alcalinidad (mg/L)	515	461	500	500	500	500	400	400										
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	<1.0	<1.0	Aus	Aus	Aus	Aus	1000	1000	200	200	1000	1000			200	200		
Coliformes totales (NMP/100ml)	249.5	263.1	Aus	Aus	Aus	Aus												
Temperatura (°C)	24.75	24.99					Condiciones naturales +2,5				Condiciones nat +1,6							
SDT	1110	640	1000	1000	1000	1000	1000	1000										
pH	7.91	7.43	6.5-8.5	6.5-8.5	6.5-8.6	6.5-8.6	5-9	5-9			4.5-9.0	4.5-9.0						
OD (mg/L)	1.32	1.55					4	4							5	5		

Dzapacal	Resultados		Uso del agua para diferentes actividades humanas														Indicador Muestra 1	Indicador Muestra 2
	Muestreos		Agua Potable				CE-CCA-001/89 SEMARNAT											
	1	2	N.O.M-127-SSA1(1994) modif 2000		O.M.S International Standards		Fuente Abastecimiento de Agua Potable		Recreativo c/contacto primario		Riego agrícola		Pecuario		Protección vida acuática (agua dulce)			
			1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2		
Sulfatos (mg/L)	6.252	19.875	400	400			500	500			130	130			0.005	0.005		
Cloruros (mg/L)	27.86	81.397	250	250	250	250	250	250			148	148			250	250		
Nitratos (mg/L)	12.857	21.917	10	10	50	50	5	5					90	90				
Nitritos (mg/L)	<LDM	<LDM	0.05	0.05	3-0.2	3-0.2	0.05	0.05					10	10				
Amonio (mg/L)	0.32	0.11	0.5	0.5											0.06	0.06		
Fosfatos (mg/L)	<LDM	<LDM					0.1	0.1							0.025	0.025		
Alcalinidad (mg/L)	305	476	500	500	500	500	400	400										
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	<1.0	<1.0	Aus	Aus	Aus	Aus	1000	1000	200	200	1000	1000			200	200		
Coliformes totales (NMP/100ml)	<1.0	424.5	Aus	Aus	Aus	Aus												
Temperatura (°C)	26.87	26.82					Condiciones naturales +2,5				Condiciones nat +1,6							
SDT	1120	690	1000	1000	1000	1000	1000	1000										
pH	7.84	7.49	6.5-8.5	6.5-8.5	6.5-8.6	6.5-8.6	5-9	5-9			4.5-9.0	4.5-9.0						
OD (mg/L)	2.05	6.65					4	4							5	5		

Chelentún	Resultados		Uso del agua para diferentes actividades humanas														Indicador Muestra 1	Indicador Muestra 2
	Muestreos		Agua Potable						CE-CCA-001/89 SEMARNAT									
	1	2	N.O.M-127-SSA1(1994)		O.M.S International		Fuente Abastecimiento		Recreativo c/contacto		Riego agrícola		Pecuario		Protección vida acuática (agua)			
			1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2				
Sulfatos (mg/L)	19.370	19.220	400	400			500	500			130	130			0.005	0.005		
Cloruros (mg/L)	109.8	135.8	250	250	250	250	250	250			148	148			250	250		
Nitratos (mg/L)	23.350	17.810	10	10	50	50	5	5					90	90				
Nitritos (mg/L)	<LDM	<LDM	0.05	0.05	3-0.2	3-0.2	0.05	0.05					10	10				
Amonio (mg/L)	0.12	0.21	0.5	0.5											0.06	0.06		
Fosfatos (mg/L)	<LDM	<LDM					0.1	0.1							0.025	0.025		
Alcalinidad (mg/L)	383	309	500	500	500	500	400	400										
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	<1.0	<1.0	Aus	Aus	Aus	Aus	1000	1000	200	200	1000	1000			200	200		
Coliformes totales (NMP/100ml)	1011	173.1	Aus	Aus	Aus	Aus												
Temperatura (°C)	27.07	26.81					Condiciones naturales +2,5				Condiciones nat +1,6							
SDT	1430	1160	1000	1000	1000	1000	1000	1000										
pH	7.37	7.10	6.5-8.5	6.5-8.5	6.5-8.6	6.5-8.6	5-9	5-9			4,5-9,0/4,5-9,0							
OD (mg/L)	3.85	5.39					4	4							5	5		

Bebelchén (Villa 56)	Resultados		Uso del agua para diferentes actividades humanas														Indicador Muestra 1	Indicador Muestra 2
	Muestreos		Agua Potable						CE-CCA-001/89 SEMARNAT									
	1	2	N.O.M-127-SSA1(1994) modif 2000		O.M.S International Standards		Fuente Abastecimiento de Agua Potable		Recreativo c/contacto primario		Riego agrícola		Pecuario		Protección vida acuática (agua dulce)			
			1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2				
Sulfatos (mg/L)	12.093	24.243	400	400			500	500			130	130			0.005	0.005		
Cloruros (mg/L)	59.14	75.344	250	250	250	250	250	250			148	148			250	250		
Nitratos (mg/L)	20.253	21.229	10	10	50	50	5	5					90	90				
Nitritos (mg/L)	<LDM	<LDM	0.05	0.05	3-0.2	3-0.2	0.05	0.05					10	10				
Amonio (mg/L)	0.18	0.15	0.5	0.5											0.06	0.06		
Fosfatos (mg/L)	<LDM	<LDM					0.1	0.1							0.025	0.025		
Alcalinidad (mg/L)	441	458	500	500	500	500	400	400										
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	<1.0	<1.0	Aus	Aus	Aus	Aus	1000	1000	200	200	1000	1000			200	200		
Coliformes totales (NMP/100ml)	<1.0	691.0	Aus	Aus	Aus	Aus												
Temperatura (°C)	25.41	25.58					Condiciones naturales +2,5				Condiciones nat +1,6							
SDT	1220	740	1000	1000	1000	1000	1000	1000										
pH	7.67	6.78	6.5-8.5	6.5-8.5	6.5-8.6	6.5-8.6	5-9	5-9			4,5-9,0/4,5-9,0							
OD (mg/L)	4.71	4.97					4	4							5	5		