



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
UNIDAD ACADÉMICA COZUMEL
DIVISIÓN DE DESARROLLO SUSTENTABLE

DOCTORADO EN DESARROLLO SOSTENIBLE

Evaluación integral del ambiente cárstico para generar un modelo de manejo sostenible del acuífero en la isla de Cozumel.

TESIS

Para obtener el grado de

Doctor en Desarrollo Sostenible

PRESENTA

Gerardo Hernández Flores



INTEGRANTES DEL COMITÉ ASESOR

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Martha Angélica Gutiérrez Aguirre

ASESOR

Dr. Adrián Cervantes Martínez

ASESORA

Dra. Ana Elizabeth Marín Celestino

ASESORA

Dra. Julia Guadalupe Pacheco Ávila

ASESOR

Dr. Oscar Frausto Martínez

ASESOR

Dr. Philip Van Beynen

ASESORA

Dra. Teresa Álvarez Legorreta



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE DESARROLLO SUSTENTABLE

Cozumel, Quintana Roo, a 24 de mayo de 2021

Con fundamento en el artículo 13, fracción III y IV, artículo 45 fracción IV del Reglamento de Estudios de Posgrado de la Universidad de Quintana Roo, los miembros del Comité de Asesores del trabajo de tesis denominado: "Evaluación integral del ambiente cárstico para generar un modelo de manejo sostenible del acuífero en la isla de Cozumel", elaborado(a) por el (la) C. Gerardo Hernández Flores (1722423) del Doctorado en Desarrollo Sostenible, tenemos a bien informar que otorgamos nuestra anuencia y aprobación del tema de tesis presentado (artículo 48), como requisito parcial para obtener el grado de:

Doctor en Desarrollo Sostenible



Atentamente





Dra. Martha Angélica Gutiérrez Aguirre
Directora



Dr. Adrián Cervantes Martínez



Dra. Ana Elizabeth Marín Celestino



Dra. Julia Guadalupe Pacheco Ávila



Dr. Oscar Frausto Martínez

Dr. Philip van Beynen
Dr. Philip Van Beynen



Dra. Teresa Álvarez Legorreta

Índice

Índice.....	1
Resumen:.....	11
Capítulo 1. Bases y estructura del trabajo de investigación.....	14
1 Introducción.....	14
1.2 Antecedentes.....	19
1.2.1 Manejo del recurso en México y Quintana Roo.....	20
1.2.2 Manejo del recurso en Cozumel.....	21
1.3 Planteamiento del Problema.....	24
1.4 Pregunta de investigación.....	26
1.5 Hipótesis.....	27
1.6 Justificación.....	27
1.7 Objetivos.....	28
1.7.1 Objetivo General.....	28
1.7.2 Objetivos Particulares.....	29
1.8 Materiales y métodos.....	29
1.8.1 Revisión bibliográfica, entrevistas y categorización (Capítulos 2 y 3).....	30
Base de datos y revisión bibliográfica.....	32
Diagrama bivariado.....	32
Muestras de agua de mar y lluvia.....	33
Análisis de agrupamiento.....	33
Entrevistas.....	34
Categorización en un modelo inicial de aspectos relacionados con el recurso hídrico.....	36
1.8.2 Generación y actualización de información (Capítulo 4).....	36
Índice de Calidad del Agua (ICA).....	37
Muestreos.....	38
Cálculo del ICA.....	40
Índice de sostenibilidad de ambientes cársticos (ISAC).....	43
Indicadores de servicios de distribución.....	46
Aguas residuales.....	47
Precio del agua.....	47
Consumo de agua por usuario.....	48
Dinámica de recarga del acuífero, extracción y consumo.....	49
Análisis de datos.....	51
Estimación de tendencias.....	51
Pendiente de Sen.....	53
Diagramas de caja.....	53
Análisis de series de tiempo.....	54
1.8.3 Integración (Capítulo 5).....	54
Indicadores.....	55
Valores de subíndices.....	55
Peso.....	55
Agregación.....	56
1.8.4 Propuesta de modelo de manejo sostenible.....	56
1.9 Área de estudio.....	58

Suelo.....	59
Clima y precipitación	60
Vegetación.....	62
Cenotes	62
Biota asociada con el acuífero.....	63
1.10 Discusión y Conclusiones	63
Capítulo 2 - Manejo integral sostenible de acuíferos costeros e insulares*	65
2.1 Introducción	65
2.2 Objetivo.....	65
2.3 Desarrollo y análisis	65
2.4 Conclusión.....	73
Capítulo 3 – El acuífero en Cozumel: caracterización ambiental, económica y social. *.....	74
3.1 Introducción	74
3.2 Objetivos	75
3.3 Resultados	76
3.3.1 Ambiental.....	76
Grupos de agua.....	77
Base de datos.....	77
Análisis bivariado.....	80
Análisis de agrupamiento.....	81
3.3.2 Económico	90
Cobertura de agua potable.....	91
3.3.3 Social.....	91
Entrevistas	91
Percepción del recurso	91
Percepción del consumo de agua	94
3.3.4 Modelo para caracterizar a los aspectos relacionados con el recurso hídrico	96
3.4 Discusión.....	97
3.4.1 Ambiental.....	97
Estado de Pozos en UGA C1.....	97
Grupos de agua.....	98
3.4.2 Económico	104
3.4.3 Social.....	105
Entrevistas	105
3.4.4 Modelo para caracterizar a los aspectos relacionados con el recurso hídrico	107
3.5 Conclusiones	107
Capítulo 4 – Hacia la sostenibilidad del acuífero de Cozumel. *.....	110
4.1 Introducción	110
4.2 Objetivos	111
4.3 Resultados	112
4.3.1 Índice de Calidad del Agua (ICA).....	112
4.3.2 Índice de Sostenibilidad de Ambientes Cársticos (ISAC).....	114
4.3.3 Indicadores de servicios de distribución	130
Manejo de aguas residuales.....	130
Tarifa del agua.....	131
Consumo por usuario	131
4.3.4 Dinámicas de recarga estimada del acuífero, extracción de agua y consumo.....	132

Análisis de tendencias	133
Estacionalidad	134
Precipitación y temperatura.....	135
Evapotranspiración.....	136
Recarga estimada.....	137
Extracción de agua de la UGA C1 y el consumo por sector	138
4.4 Discusión.....	140
4.4.1 Índice de Calidad del Agua	140
Parámetros de calidad del agua	140
Índice de calidad del agua	144
4.4.2 Índice de sostenibilidad de ambientes cársticos.....	144
4.4.3 Indicadores de servicios de distribución	148
Tratamiento de agua residual	148
Tarifa de agua.....	149
Consumo por usuario	149
4.4.4 Dinámicas de recarga estimada del acuífero, extracción de agua y consumo.....	151
4.5 Conclusiones	157
Capítulo 5 – Modelo para el manejo sostenible del acuífero	159
5.1 Introducción	159
5.2 Objetivo.....	159
5.3 Resultados	160
5.3.1 Índice integrativo	160
Ambiente	164
Económica.....	168
Social.....	169
Calificación del Índice	174
5.3.2 Modelo para el manejo sostenible del acuífero.....	174
5.3.3 Propuesta manejo integral	175
5.4 Discusión.....	182
5.4.1 Índice Integrativo	182
Análisis por eje del desarrollo Sostenible	182
5.4.2 Modelo para el manejo sostenible del acuífero y propuesta de manejo integral.....	185
5.5 Conclusiones	187
Capítulo 6 – Discusión General	188
Capítulo 7 – Conclusiones Generales.....	201
8 Referencias	204
Anexo 1. Instrumento utilizado para encuestas.....	234
Anexo 2. Índice original: Karst Sustainability Index (Van Beynen et al., 2012).....	236
Anexo 3. Tarifas de agua potable del mes de febrero de 2020- Oficio No. CAPA-CC-051-2020 (CAPA, 2020).	237
Anexo 4. Oficios respuesta a las solitudes 00625918 - Oficio No. DDUE/SE/2018/401 y 00625818 - No. Oficio DDUE/SE/2018/402.....	239
Anexo 5. Folleto sobre el foro del agua organizado en el 2018 (anverso y reverso).	245
Anexo 6. Primer artículo.....	247
Anexo 7. Segundo artículo.....	251
Anexo 8. Tercer artículo.....	262

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa sobre la ubicación de UGAS, UGA C1 y pozos administrados por CAPA.....	16
Figura 2. Diagrama sobre las fases de la investigación, capítulos, objetivos y estructura metodológica abordados en el trabajo de tesis (elaboración propia).....	30
Figura 3. Pozos muestreados en este estudio.	39
Figura 4. Modelo de acuíferos costeros. Modificado de Todorovic & Verruijt, 1968.....	59
Figura 5 Distribución de la precipitación en el estado de Quintana Roo, en Cozumel se identifica menor precipitación en el extremo Noreste. Tomado de Orellana et al., 2007	60
Figura 6. Precipitación total promedio en mm por mes para municipios de Quintana Roo, incluyendo Cozumel (azul claro) de 1991-2016. Tomado de INEGI, 2017.	61
Figura 7. Tipos de vegetación en Cozumel. Tomado de Escalante, 1996.....	62
Figura 8.Estado anual de los pozos ubicados en UGA C1 para el periodo 2013 a 2018.	77
Figura 9. Sitios de muestreo que cuentan con información de calidad del agua del año 2002 al 2018 (BD) y 2005 al 2018 (BDCAPA).....	78
Figura 10. Relación CE vs Cl.....	81
Figura 11. Relación CE vs Cl en UGA C1.....	81
Figura 12. Dendrograma con los 3 grupos y un subgrupo de agua.	84
Figura 13. Ubicación de los sitios de muestreo de cada grupo de agua.....	85
Figura 14.Elementos básicos para considerar en el desarrollo de un modelo de manejo sostenible del acuífero en Cozumel. (Elaboración propia).	97
Figura 15. Pozos muestreados y problemáticas observadas dentro del área.	113
Figura 16. Índice de Calidad del Agua para los pozos muestreados.	114
Figura 17. Tablero de avances actuales hacia la sustentabilidad en Cozumel.	116
Figura 18. Imágenes de satélite del área sur de la Isla en mayo-2010(a) y diciembre-2018(b).	121
Figura 19. Ubicación de las UGAs en Cozumel.	122
Figura 20. Imágenes de la ciudad de Cozumel de diciembre-2004(a) y enero-2016(b).	128
Figura 21. Imágenes de satélite de la vegetación en Cozumel en diciembre-1994(a) y diciembre-2016(b).....	128
Figura 22. Variaciones mensuales de cada indicador dentro del periodo de tiempo analizado.	135
Figura 23. Precipitación mensual(a) y temperatura(b) media registrada en Cozumel de 1989 a 2019.	136
Figura 24. Evapotranspiración estimada de 1989 a 2019.....	137
Figura 25. Recarga estimada del acuífero en Cozumel 1990 a 2019.	138
Figura 26. Volumen de extracción mensual por CAPA de 2005-2018.....	140
Figura 27. Consumo mensual de agua por los diferentes sectores de 2005-2018. El eje secundario corresponde con el consume doméstico.	140
Figura 28. Fotografía digital del área de captación en 2018.	164
Figura 29. Modelo sostenible para el Acuífero de Cozumel (elaboración propia).....	175

Índice de Tablas

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos de muestras tomadas en UGA C1.....	24
Tabla 2. Peso de cada parámetro, ponderación relativa y límites utilizados dentro del ICA.	41
Tabla 3.Resumen de los parámetros fisicoquímicos de la BD y BD CAPA.....	79
Tabla 4. Análisis de Componentes Principales de variables indicadoras de calidad de agua.	84
Tabla 5.Características de cada uno de los grupos de agua formados en el dendrograma.	86

Tabla 6. Estadísticos descriptivos de los 3 grupos y un subgrupo de agua.	89
Tabla 7. Número de entrevistados y sectores.	91
Tabla 8. Estadísticos descriptivos para los parámetros de calidad de agua muestreados en UGA C1.	112
Tabla 9. Indicadores, valores objetivo, puntuación y fecha de la información consultada del ISAC adecuado a Cozumel.	115
Tabla 10. Porcentajes anuales de tratamiento de agua residual.....	130
Tabla 11. Tarifa de agua estimada para los diferentes sectores en febrero 2020.	131
Tabla 12. Consumo de agua en litros/usuario/día por año de 2005 a 2019.....	132
Tabla 13. Estadísticos descriptivos y los resultados de la función de autocorrelación.	133
Tabla 14. Resultados de la prueba de Mann-Kendall y la pendiente de Sen. Las tendencias son significativas con un $\alpha = 0.05$	134
Tabla 15. Indicadores, criterios para evaluación, peso, puntuación, años en los cuales se obtuvo la información, sumatoria y fuente para el Índice Integrativo para el Manejo Sostenible de Acuíferos Insulares (IIMSAI).	161
Tabla 16. Enfermedades asociadas al agua registradas en Cozumel del 2018 y 2019.	174
Tabla 17. Objetivos y estrategias para para atender el punto 6a de la propuesta de manejo integral.	176
Tabla 18. Objetivos y estrategias para para atender el punto 6b de la propuesta de manejo integral.	179
Tabla 19. Objetivos y estrategias para para atender el punto 6c de la propuesta de manejo integral.	180
Tabla 20. Objetivos y estrategias para para atender el punto 6d de la propuesta de manejo integral.	181

Glosario

AHC	- Asociación de Hoteles de Cozumel
ACP	- Análisis de Componentes Principales
AMA	- Asociación Mundial para el Agua
ANP	- Áreas Naturales Protegidas
BD	- Base de Datos para los grupos de agua
BDCAPA	- Base datos CAPA
CAPA	- Comisión de Agua Potable y Alcantarillado
CARICOM	- Comunidad del Caribe
CARIWIN	- Iniciativa del Agua del Caribe
CC	- Consejos de Cuenca
CCPY	- Consejos de Cuenca de la Península de Yucatán
CE	- Conductividad Eléctrica
CEDIP	- Centro de Estudios de Derecho e Investigaciones Parlamentarias
CFSR	- Sistema Reanálisis de Predicción Climática
Cl ⁻	- Cloruros
CONAGUA	- Comisión Nacional del Agua
CONANP	- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas
COTAS	- Comités Técnicos de Aguas Subterráneas
CT	- Coliformes Totales
CWSI	- Canadian Water Sustainability Index
DT	- Dureza Total
EToi	- Evapotranspiración Mensual
FPMC	- Fundación de Parques y Museos de Cozumel
GWP	- Global Water Partnership
ICA	- Índice de Calidad de Agua
ICSA	- Índice Canadiense para la Sostenibilidad del Agua
IIMSAI	- Índice Integrativo para el Manejo Sostenible de Acuíferos Insulares
INEGI	- Instituto Nacional de Estadística y Geografía
ISAC	- Índice de sostenibilidad de Ambientes Cársticos
ISD	- Indicadores de Servicios de distribución
ISPEID	- Índice de Sostenibilidad para los Pequeños estados Insulares en Desarrollo
LAN	- Ley de Aguas Nacionales
LAPAEQR	- Ley de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Quintana Roo
LGEEPA	- Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente
MIRH	- Manejo Integrado de Recursos Hídricos
MISACI	- Manejo Integral Sostenible de Acuíferos Costeros e insulares
MIZC	- Manejo Integral de Zonas Costeras
MKT	- Prueba de Mann-Kendall
MSAC	- Modelo Sostenible para el Acuífero de Cozumel
NCEP	- Centros Nacionales de Predicción Ambiental

NO ₂ ⁻	- Nitritos
N-NO ₃ ⁻	- Nitrógeno como Nitratos
NO ₃ ⁻	- Nitratos
NOM	- Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994
OD	- Oxígeno Disuelto
ONG	- Organización No Gubernamental
ONU	- Organización de las Naciones Unidas
OSA	- Observatorio para la Sostenibilidad del Acuífero
PASA	- Promotora Ambiental de la Laguna
PDU	- Programa de Desarrollo Urbano
Pi	- Precipitación Mensual
PIB	- Producto Interno Bruto
PIeIs	- Políticas, Instituciones e Instrumentos
PIFID	- Políticas, Instituciones, Métodos de Financiamiento, Integración de usuarios dentro del manejo y Divulgación
POEL	- Programa de Ordenamiento Ecológico Local
PROFEPA	- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente
PSO	- Porcentaje de Saturación de Oxígeno
R ₁	- Función de Autocorrelación
r ²	- Coeficiente de Correlación
REPDA	- Registro Público de Derechos del Agua
SCAL	- Sistema de Captación de Agua de Lluvia
SDWA	- Safe Drinking Water Act
SIG	- Sistemas de Información Geográfica
SINA	- Sistema Nacional de Información del Agua
SO ₄ ²⁻	- Sulfatos
SRH	- Secretaría de Recursos Hidráulicos
SSE	- Sistemas Socioecológicos
STC	- Capacidad Máxima de Humedad del Suelo
STD	- Sólidos Totales Disueltos
TGS	- Teoría General de Sistemas
UGA	- Unidad de Gestión Ambiental
UMA	- Unidad de Medida y Actualización
UNICEF	- The United Nations Children's Fund
UNID	- Universidad Interamericana Para el Desarrollo
UQRoo	- Universidad de Quintana Roo
VEDS	- Volúmenes de Extracción Diario Sostenibles
WaSH	- Agua, Saneamiento e Higiene
WFD	- Water Framework Directive
ZOFEMAT	- Zona Federal Marítimo Terrestre

Resumen:

El manejo del recurso hídrico es de vital importancia para los ambientes insulares cársticos, pues el volumen disponible de agua dulce es limitado, el acuífero es la única fuente viable para las actividades socioeconómicas, su recarga depende de la precipitación y es altamente vulnerable a los efectos del cambio climático y la contaminación. En este trabajo se desarrolló un modelo de gestión sostenible del acuífero en el área de captación de Cozumel fundamentado en la teoría general de sistemas y el concepto de la teoría de sistemas socio ecológicos, considerando modificaciones a indicadores sobre el estado actual del acuífero en la UGA C1, su entorno ambiental, las actividades económicas dependientes del recurso, servicios de distribución, usos y tradiciones del agua, demografía, aspectos de la salud y jurídicos relacionados con el agua potable.

Para ello se analizó mediante sistemas de información geográfica y estadística multivariada a información producto de una revisión bibliográfica y entrevistas semiestructuradas realizadas a personas vinculadas con el acuífero de diferentes sectores (académico, asociaciones civiles e iniciativa privada). En esta primera parte, con la información consultada se describieron los aspectos sociales, económicos y ambientales que se relacionan con el acuífero en Cozumel, caracterizándolos dentro de un modelo. Después para determinar el estado actual de la calidad del agua de uso potable que se distribuye en Cozumel, se adecuaron y aplicaron indicadores: Índice de calidad del agua (ICA), estado de las prácticas hacia la sostenibilidad, indicadores de servicios de distribución, las dinámicas de variables hidrometeorológicas e hídricas. Finalmente se integró la información dentro de una propuesta de Índice Integrativo para el Manejo Sostenible de Acuíferos Insulares (IIMSAI).

Dentro del estudio, con el análisis de la revisión bibliográfica se encontró un incremento en el número de pozos abatidos ($\uparrow 77\%$) y en reposo ($\uparrow 38\%$) en la zona de extracción, se identificaron tres grupos de agua y un subgrupo (con base en variables indicadoras de calidad de agua) y se observó una falta general de información sobre el acuífero de Cozumel. Por otra parte, muestreos en los pozos de extracción administrados por CAPA permitieron estimar un valor promedio del ICA de 39, se identificó un avance en las prácticas hacia la sostenibilidad, así como un volumen de agua residual tratada del 100%, reconociendo al sector hotelero como el que paga la tarifa más alta por metro cúbico por el servicio de distribución de agua potable y quién más agua consume por usuario (L/usuario/día). Dentro

de este trabajo también se estimó en distintos periodos de tiempo un incremento significativo en los valores mensuales promedio de temperatura ($Z=7.384$), evapotranspiración ($Z=5.728$), volumen de extracción de los pozos ($Z=8.940$), consumo por los sectores comercial ($Z=7.236$) y servicios generales ($Z=7.236$); además de un decremento en precipitación mensual ($Z=-2.780$) y la recarga estimada en la UGA C1 ($Z=-2.938$). Estos resultados son indicativos de un decremento en los volúmenes de agua disponibles en Cozumel, con lo cual se vería afectada toda la población permanente e itinerante que depende de este recurso.

En el IIMSAI se estimó un valor de 0.43 con lo que se clasifica de “insostenible” al actual manejo del acuífero. Las variables que influyen en la falta de sostenibilidad son el decremento en la recarga estimada del acuífero, un aumento en los volúmenes de agua extraída de la UGA C1, la necesidad de monitoreo en la zona de pozos de extracción, la falta de difusión de información y concientización sobre el uso responsable del recurso, la falta de financiamientos para un MIRH, así como un incremento del crecimiento urbano y poblacional. Finalmente, el MSAC es una propuesta de guía metodológica para el desarrollo de objetivos que definan estrategias integrativas en políticas, instituciones, financiamientos y la divulgación en el corto, mediano y largo plazo; fundamentados en la evaluación de información disponible sobre los elementos con los que se relaciona el acuífero.

Según el MSAC propuesto en este trabajo, para el manejo del agua en la Isla en el corto plazo: se deben revisar los mecanismos que permitan una colaboración multidisciplinaria con CAPA e investigadores locales para el monitoreo del recurso, crear un sistema de información para la generación, compilación, análisis de indicadores relacionados con el acuífero, establecer un grupo encargado de la búsqueda, trámite y/ o generación de financiamiento para solventar las estrategias planteadas por el grupo multidisciplinario y establecer mecanismos para la difusión de información. En el mediano plazo se requiere de la integración de usuarios de los diferentes sectores dentro del grupo multidisciplinario, el establecimiento del COTA para el acuífero de Cozumel, evaluar los instrumentos del (observatorio para la sostenibilidad del acuífero) OSA junto con las decisiones del grupo multidisciplinario y las estrategias para el financiamiento. En el largo plazo se sugiere evaluar las acciones para verificar el adecuado funcionamiento de cada uno de los elementos que integran el MIRH y la sostenibilidad del acuífero insular, junto con comenzar a crear un

ambiente propicio enfocado en atender la biodiversidad local, suelo y el manejo de costas en Cozumel.

Capítulo 1. Bases y estructura del trabajo de investigación

1 Introducción

El agua es un recurso vital para todos los ecosistemas, organismos y actividades dentro del planeta. Aunque el líquido cubre aproximadamente el 70% de la superficie de la tierra, sólo el 3% se considera como agua dulce (Long & Pijanowski, 2017); pues la mayor parte se encuentra dentro de los océanos y su aprovechamiento para consumo es limitado por su contenido de sales. El agua dulce (con baja salinidad) se distribuye en los continentes de manera heterogénea, acumulándose para formar cuerpos de agua como ríos, lagos y acuíferos. En México al 2017 se tienen identificados 653 acuíferos de los cuales se surte el 39.1% del volumen total concesionado para usos consuntivos, aproximadamente 34,380 millones de metros cúbicos por año (CONAGUA, 2018a).

Sin embargo, la disponibilidad de agua dulce en cantidad suficiente y con buena calidad es uno de los mayores retos que la sociedad enfrentará en este siglo (Distefano & Kelly, 2017). En los pasados 200 años la población mundial se ha incrementado exponencialmente, alcanzando casi 7 mil millones de personas en 2011. El aumento poblacional ha resultado en una rápida expansión urbana, reflejándose en un incremento de la ocupación del territorio y en la demanda de recursos primarios (agua, materiales de construcción, comida, electricidad, etc.); además de la contaminación al ambiente por las industrias, desechos, tránsito, etc. (Gutiérrez et al., 2014). En México se estima que 105 de los 653 acuíferos ya presentan evidencia de sobre extracción y un 70% de los cuerpos de agua presentan algún grado de contaminación (Arellano, 2019; Valencia, 2020); incluyendo los cuerpos de agua dentro de la región cárstica de la Península de Yucatán.

Las regiones cársticas son importantes, pues a nivel mundial ocupan aproximadamente del 10 al 20% de la superficie (Van Beynen et al., 2012) y son la principal fuente de agua potable en el planeta (aproximadamente del 20-50%) (Hartmann et al., 2015; Steube et al., 2009; Van Beynen et al., 2012). En estas regiones, el agua de lluvia interactúa con compuestos (CO_2 o ácidos orgánicos) para acidificarse y disolver los estratos cársticos formando fracturas que pueden dar lugar a complejos sistemas subterráneos. Estos procesos le confieren una alta porosidad y altas tasas de infiltración, por lo que tienen la capacidad de almacenar grandes volúmenes de agua subterránea. Además, las altas tasas de infiltración casi no permiten la

formación de cuerpos de agua superficiales (como ríos o lagos), aunque pueden llegar a formarse cuerpos de agua efímeros como las “aguadas”. Desafortunadamente en ambientes cársticos los acuíferos son altamente vulnerables debido a la facilidad con la que se pueden infiltrar, incorporar y transportar contaminantes (Medici et al., 2019). En el sureste de México, la mayor parte del territorio de la Península de Yucatán está compuesto por carst, incluyendo las islas del Caribe Mexicano.

Cozumel es una isla cárstica en donde el agua subterránea es la única fuente viable de agua dulce para surtir las necesidades ambientales y de las actividades en la Isla (Hernández-Flores et al., 2020; SECTUR, 2018). El acuífero en Cozumel es una lente de agua dulce formado por la infiltración de agua de lluvia que se acumula y flota sobre el agua salada, presentando una zona de transición llamada interfase (agua dulce y salada) y cuya profundidad depende de la geología, la divergencia del flujo, los cambios dinámicos de tasas de flujo, recargas, mareas, etc., (Lesser et al., 1978).

El agua con la que se surte la demanda en la Isla se obtiene de pozos que se encuentran en la zona centro-norte y son administrados por la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado (CAPA). De acuerdo con el Programa de Ordenamiento Ecológico Local (POEL), los pozos se encuentran dentro de la Unidad de Gestión Ambiental (UGA) C1 (Figura 1). Los pozos se agrupan en 5 ejes que se extienden perpendicularmente desde la carretera transversal y cuya numeración comienza con el eje 1 en la esquina superior izquierda (Noroeste) y continua en el sentido de las manecillas del reloj hasta el eje 5. Actualmente CAPA se enfoca en monitoreos de calidad del agua, selección de pozos para extracción, extracción de agua, potabilización y distribución. A grandes rasgos, el manejo actual del acuífero no puede considerarse integral, pues la responsabilidad de manejo recae principalmente sobre CAPA. Sumado a esto, las características geohidrológicas propician una alta vulnerabilidad, con reportes de contaminación dentro del acuífero (Coronado-Álvarez et al., 2011; Steenbeck et al., 2016), además de un incremento de la demanda de agua producto del crecimiento socioeconómico (SECTUR, 2018) y un desconocimiento sobre los efectos que podrían generarse por el cambio climático.

Un manejo integral sostenible del acuífero en la Isla se debe fundamentar en el análisis de información actualizada sobre los elementos que componen e interactúan con el recurso y

con los cuales se desarrollen estrategias para asegurar la disponibilidad del agua en el futuro. El concepto de desarrollo sostenible se formalizó en 1987 y se define como: “el desarrollo que satisface las necesidades de la generación actual sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades” (WCED, 1987:41). Esta definición fue la base para el desarrollo de conceptos como el Manejo Integral del Recurso Hídrico (MIRH), en la cual se busca un aprovechamiento responsable del agua.

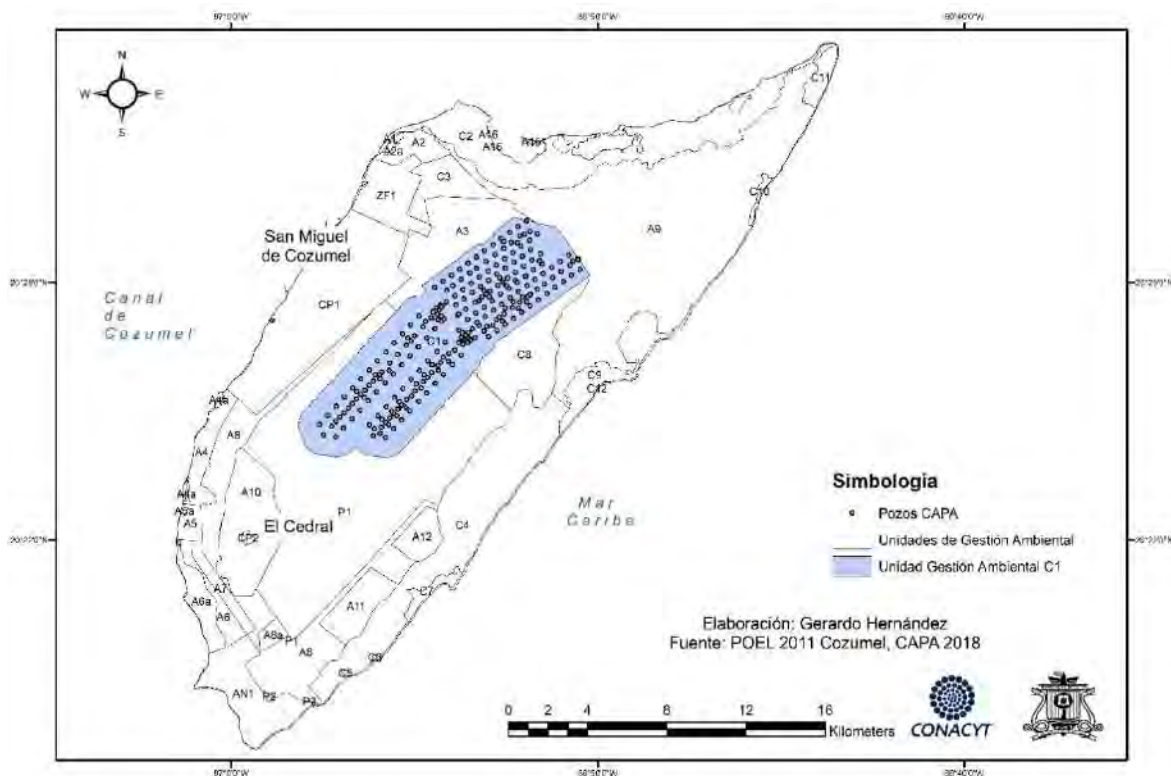


Figura 1. Mapa sobre la ubicación de UGAS, UGA C1 y pozos administrados por CAPA.

Actualmente, para describir el volumen y la calidad de agua de un acuífero es recomendable un monitoreo constante de parámetros indicadores de calidad de agua con fundamento en las Normas oficiales mexicanas como la NOM-127-SSA1-1994, NOM-032-ECOL-1993, NOM-003-ECOL-1997 y la NOM-001-ECOL-1996 (Secretaría de Salud, 1996; SEMARNAT, 1993, 1997a, 1997b). Complementariamente, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) monitorea en cuerpos de agua: la demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST) y coliformes fecales (CF) (CONAGUA, 2018b). Desafortunadamente con estos 4 indicadores es difícil abarcar la complejidad de un acuífero y sus dinámicas, requiriendo de más parámetros indicadores de

calidad de agua específicos para cada caso. Por ello, es recomendable la adecuación de índices de calidad de agua a las condiciones locales para que contribuyan con la caracterización de los cuerpos de agua subterráneos. Complementariamente, se requiere el identificar los volúmenes de consumo de diferentes sectores a través del tiempo con los cuales se identifiquen patrones en el consumo de agua y que sean la base para proponer estrategias que favorezcan un aprovechamiento adecuado del recurso. Actualmente en Cozumel no se cuenta con información clara sobre el volumen de agua consumido por los diferentes sectores de usuarios, por lo que se necesitan estudios que los caractericen.

El manejo del acuífero en Cozumel requiere de considerar los elementos relacionados con el recurso para su comprensión de manera integral y con ello favorecer un aprovechamiento responsable (Stevanović et al., 2007). Además, es necesario que se complemente al MIRH con la visión de diferentes teorías integrativas como la Teoría General de Sistemas (TGS) y Sistemas Socioecológicos (SSE); con el fin de evitar analizar sólo a los componentes de manera individual (enfoque mecanicista). Dentro del enfoque mecanicista definido por Martínez (Martínez, 2006), se plantea que para entender a los fenómenos es necesario de una fragmentación y análisis de sus partes individuales; por lo que no hay asociaciones o interrelaciones entre las partes, sólo de sumación, conjunción y disyunción. Por estas razones, el enfoque mecanicista no es apto para el desarrollo de trabajos en donde se consideran una gran cantidad de componentes y relaciones de múltiples variables, como en el desarrollo sostenible. Entonces, un enfoque que permite la integración de variables es el sistémico, el cual data desde los griegos y tiene el origen en el campo de las matemáticas (Hammond, 2003), mismo que se ha retomado recientemente y ha permitido describir problemas en la actualidad (Eguzki, 2010). Alrededor de la década de los 50s, Bertalanffy propuso la teoría general de sistemas, en la cual plantea el concepto de “isomorfías”. Las isomorfías son características compartidas por sistemas que aparentemente no están relacionados, pudiendo ser de distintas escalas y permitiendo establecer una conexión entre los sistemas a nivel organizacional y funcional (Bertalanffy, 1950). En el enfoque sistémico se abordan los fenómenos y objetos como parte de un todo, pues la interacción integral produce nuevas cualidades con características diferentes y superiores a los componentes que lo conforman; además de contar con 4 cualidades: los componentes, la estructura, las funciones y la integración (Rosell & Más, 2003). El enfoque sistémico puede utilizarse para el estudio del

desarrollo sostenible, pues actualmente se apoya con otras teorías para abordar al manejo de los acuíferos (Martínez, 2006) como: el aprendizaje social (Pahl-Wostl et al., 2007), criterios de confiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad para la evaluación de sistemas de recurso hídrico (Hashimoto et al., 1982) y la teoría de SSE (Ostrom, 2007, 2009). La teoría de SSE integra aspectos de los recursos naturales y socioeconómicos, por lo que es descrita como: “un sistema formado por un componente (subsistema) societal (o humano) en interacción con un componente ecológico (o biofísico). Puede ser urbano o rural y puede definirse a diferentes escalas, desde lo local a lo global” (Gallopín, 2003:15-16). De acuerdo con Ostrom (2009) en los SSE se manejan 4 niveles núcleo de subsistemas que son apoyo para identificar las variables relevantes en estudios: 1) recursos en el sistema (ejemplo: territorios, áreas, sistemas acuáticos), 2) unidades del recurso (ej. árboles, arbustos, flujo de agua), 3) sistemas de gobernanza (ej. gobierno, tipos de regulaciones y leyes) y 4) usuarios (ej. individuos que utilizan los recursos para sustento, recreación o usos comerciales). Al concepto propuesto por Ostrom, se le han adicionado los servicios ecosistémicos como un apoyo para el desarrollo de investigación transdisciplinaria y su implementación (Liehr et al., 2017). Complementariamente con las teorías que pueden formar una sinergia con el MIRH, la adecuación de instrumentos y métodos a las condiciones locales puede apoyar en la descripción y actualización de información; siendo algunos de los instrumentos y métodos utilizados dentro del MIRH: entrevistas, análisis estadísticos, índices, sistemas de información geográfica, series de tiempo y modelos.

Mediante esta visión integral para un manejo de recursos hídricos en donde confluyen la TGS y SSE, junto con la adecuación de instrumentos y métodos a las condiciones locales, es posible integrar los resultados obtenidos en este trabajo dentro de una propuesta sostenible para el acuífero en Cozumel. Los resultados servirán como base para la toma asertiva de decisiones sobre la planeación de la Isla con respecto a la disponibilidad y calidad del agua dulce; encaminando a un desarrollo urbano y económico que no comprometa el bienestar ecosistémico, social y económico.

1.2 Antecedentes

Con relación a la sostenibilidad del agua, el MIRH se reconoce como el concepto más aceptado dentro del manejo del recurso (Erostate et al., 2020). Las propuestas para abordar el manejo hídrico varían dependiendo del área de estudio, los recursos disponibles y los objetivos propuestos. Algunas de las herramientas y métodos utilizados en el estudio del MIRH son: Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Babiker et al., 2007), análisis estadístico multivariado (Bidhendi et al., 2013; Gonçalves & Alpuim, 2011; Herrera-Silveira et al., 2005), descripción de las características fisicoquímicas del agua subterránea (Biswas & Tortajada, 2011; Hernández-Terrones et al., 2015), análisis de series de tiempo (Rodríguez-Huerta et al., 2019b, 2019a) y modelos teóricos (Van Der Zaag & Savenije, 2014b). El uso de índices relacionados con el agua es algo común, pues han permitido el abordar problemas al conceptualizarlos mediante la simplificación, cuantificación, análisis y comunicación de información compleja (Castro et al., 2015; Singh et al., 2012). Algunos ejemplos de temas analizados como parte de índices en el MIRH son: vulnerabilidad, calidad del agua, perturbación, progreso y prácticas hacia la sostenibilidad (Aguilar-Duarte et al., 2014; Castro et al., 2015; PRI, 2007; Sánchez et al., 2016; Van Beynen et al., 2012, 2018; Van Beynen & Townsend, 2005).

La sostenibilidad es una característica importante dentro del MIRH, pues requiere de una toma de decisiones sistémica e integrada (Orlove & Caton, 2010). Algunos autores han abordado al MIRH desde: sostenibilidad de agua subterránea (Gleeson et al., 2012), recursos sostenibles de agua subterránea (Lutz et al., 2009), consumo sostenible de agua (Kang et al., 2017), sostenibilidad del agua (Schnoor, 2010), uso sustentable del agua (Cervera, 2007) y desarrollo sostenible del agua (Raskin et al., 1996). Otros autores (Pandey et al., 2011) han definido la sostenibilidad como un estado óptimo, que no es fijo ni constante, sino dependiente de tiempo y espacio, por lo que requiere de ser cuantificado para evaluar su progreso. El concepto de sostenibilidad es multidimensional y no puramente científico, sino una perspectiva que puede enmarcarse dentro de un análisis científico para cada caso en particular. La consideración de estos elementos en conjunto son la base para generar un modelo que contribuya con la sostenibilidad del acuífero.

1.2.1 Manejo del recurso en México y Quintana Roo

En el contexto de México, es importante conocer el grado de influencia actual de la comunidad, empresarios y gobierno, con respecto al manejo del agua subterránea. Para ello es necesario ubicarnos en el periodo posterior a la Revolución Mexicana, pues a partir de ahí, en nuestro país la política hidráulica se orientó hacia el uso en la agricultura de riego. Sin embargo, después de la década de los 70, el crecimiento urbano generó la necesidad de tomar decisiones de manejo del agua, priorizando tanto a las áreas urbanas como la agricultura. Estas decisiones se tomaron desde la Federación, desde la institucionalizada y actualmente extinta Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH) (Salas, 2015) generando una administración y manejo del recurso, desde una institución centralizada.

El mismo autor afirma que ciertos intentos de descentralización se realizaron hasta 1983 y 1999, cuando se otorgaron responsabilidades de servicios de agua a los estados (uso de agua, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de sus aguas residuales). En esta etapa se creó la CONAGUA cuyas funciones son: “formular el Programa Nacional Hidráulico, apoyar y fomentar los sistemas de agua potable y alcantarillado, saneamiento y reúso de aguas, y el impulso de una cultura del agua” (Salas, 2015).

Después de la creación de la CONAGUA en 1989, en 1992 se promulga la Ley de Aguas Nacionales (LAN), la cual establece el marco legal hídrico nacional con el cual están alineados todos los demás instrumentos e instituciones relacionados con el agua. Posteriormente se han desarrollado estrategias como el Programa Nacional Hídrico dentro del Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018 (SEMARNAT & CONAGUA, 2014), en donde se abordan la planeación, objetivos, estrategias y líneas de acción para el manejo de los recursos hídricos en México, apoyándose en indicadores y un marco normativo. La visión del Programa Nacional Hídrico 2020-2024 considera “Un México donde el agua es pilar de bienestar y se realiza su manejo sustentable y coordinado con la participación de la ciudadanía, las instituciones y los órdenes de gobierno” estableciendo 5 objetivos prioritarios (CONAGUA, 2020). Adicionalmente se han publicado reportes (CONAGUA, 2018b) en donde se profundiza sobre el estado de aguas superficiales y subterráneas en México.

Para el caso del estado de Quintana Roo, en 1981 las funciones de administración de la CONAGUA pasan hacia un organismo público descentralizado, de naturaleza mixta estatal

y municipal, que se denomina CAPA para la mayoría de sus municipios. Debido a que la demanda de servicios en la zona norte del Estado excedía la capacidad de CAPA, en 1993 el gobierno estatal y los municipios de Benito Juárez e isla Mujeres otorgaron a la empresa de capital privado, Desarrollos Hidráulicos de Cancún (Aguakán), la concesión integral por 30 años de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento de ambos municipios (Álvarez-Legorreta, 2011). Pero a nivel general, en la mayoría de los municipios de Quintana Roo a partir de 2004, por una modificación de la LAN, CAPA tiene las facultades de realizar el manejo del agua a escalas locales integrando las opiniones de la sociedad, los empresarios, los académicos y los gestores en los Consejos de Cuenca locales (CC). El marco legal vigente en el Estado de Quintana Roo es abordado dentro de la Ley de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Quintana Roo, en donde se establecen las bases para la prestación y administración de los servicios (Tercera Legislatura Constitucional del Estado de Quintana Roo, 2017).

1.2.2 Manejo del recurso en Cozumel

Actualmente el manejo del recurso hídrico en la Isla es realizado principalmente por CAPA, quien se encarga de muestreos del acuífero en UGA C1, selección de los pozos para el aprovechamiento del acuífero con base en la calidad del agua, extracción, potabilización, distribución del recurso, además de organizar esfuerzos para la difusión sobre el uso responsable del recurso.

Si bien se reconoce la necesidad de abordar un uso racional del agua dentro del Plan Municipal de Desarrollo 2018-2021 tal como lo plantea la línea de acción 2.2.2.6 “Implementar un programa sostenible, de alto impacto y con actores estratégicos del medio ambiente que promueva el uso racional del agua” (Ayuntamiento del Municipio de Cozumel, 2019), aún no se establecen acciones concretas para lograrlo.

El Ayuntamiento de Cozumel en Abril 2018 creó un “grupo de trabajo del agua”, dentro de este grupo se reunieron personas de distintas áreas relacionadas con el recurso agua para discutir y proponer acciones específicas para asegurar un uso más sustentable del recurso por la población (Hernández-Flores et al., 2020), desafortunadamente a la fecha ya no se efectúan éstas interacciones.

En general, es posible clasificar los estudios sobre cantidad y calidad de agua en Cozumel de acuerdo con su origen: 1) los reportes de investigaciones científicas y 2) los monitoreos periódicos realizados por CAPA en la UGA C1. Los primeros son trabajos con puntos de muestreo seleccionados de acuerdo con objetivos específicos por parte de los investigadores; en el segundo caso, son muestreos periódicos realizados en pozos administrados por CAPA.

Dentro de los trabajos realizados como parte de investigaciones científicas, se utilizan herramientas para la descripción de los volúmenes de agua disponibles, como el balance hídrico. En el balance hídrico se maneja la relación entre la recarga (precipitación, y escorrentía) y descarga (evapotranspiración, extracciones de agua), que ocurre en una región en particular (Cervantes-Martínez, 2007). De acuerdo con Wurl et al. (2003), el balance hídrico en Cozumel indica que 75% de la precipitación anual total (1,500 mm) se pierden por consecuencia de la evapotranspiración, incorporándose sólo el 6% a la recarga natural y sin proporcionar información sobre el 19% restante; reportando también un volumen de agua anual de 4.1 Mm³ (aproximadamente 10% de las recargas anuales) extraído de los pozos administrados por CAPA. Por otra parte, la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) publicó en 2007 una compilación del balance hidrometeorológico para los años 1987, 1989, 1993 y 2002 en donde el volumen extraído de agua mediante bombeo fue de 1.3, 9.5, 4.1 y 8.2 hm³/año respectivamente; con una entrada exclusiva por lluvias en el 2002 de 777.46 hm³. En uno de los primeros trabajos para estimar el volumen del acuífero en Cozumel (Lesser et al., 1978) se reporta un volumen almacenado aproximado de 42 y 84 Mm³ con salinidad menor a 1000 ppm. Posteriormente en 2015, Coral estimó un volumen de almacenamiento en la zona de captación de 87.7 Mm³.

De acuerdo con los reportes de CAPA (Infomex, 2018b) para los años 2013-2017, se reportaron volúmenes de extracción de 3.99, 4.16, 4.51, 4.95, 4.45 hm³/año, respectivamente para pozos dentro de la zona de captación. Además, el consumo por parte de sectores como el doméstico para el periodo 2013-2018 (Infomex, 2018c) se encuentra dentro del rango de 3,013,406 m³ a 3,177,048 m³ por año. En estos reportes se observa un incremento en los volúmenes de extracción de agua dentro del periodo considerado y al sector doméstico como el principal consumidor por volumen de agua.

Los volúmenes de agua disponibles se relacionan con la calidad de la misma, por lo que ambos elementos son relevantes dentro del manejo del recurso. Se ha reportado que la calidad de agua a lo largo del acuífero no es homogénea, como se describe en trabajos previos con muestreos que abarcan toda la Isla (Scholz, 2006) y de la zona centro norte (Coronado-Álvarez et al., 2011; Guitiérrez-Aguirre et al., 2008). De acuerdo con Wurl et al. (2003), en agosto de 2000 se analizaron parámetros como conductividad eléctrica, pH, cloruros y dureza (carbonato de calcio) en 168 pozos en la UGA C1. En 2018, CAPA reporta el estado de los pozos que administra: 116 activos operando, 88 en reposo y 57 abatidos (Infomex, 2018a). CAPA realiza muestreos mensuales a los pozos dentro de la UGA C1 y con base los métodos descritos dentro de la Norma Oficial Mexicana NOM-014-SSA1-1993 (Infomex, 2018g; Secretaría de Salud, 1996). La cantidad de muestreos por año ha seguido una tendencia a disminuir del año 2013-2017 con un máximo de 1,683 y un mínimo de 285 (Infomex, 2018f). De acuerdo con información sobre estos muestreos (Infomex, 2018e), se reportó que las variables indicadoras de calidad del agua analizadas durante el periodo 2013-2018 fueron: cloruros (Cl⁻), conductividad eléctrica (CE), pH, dureza total (DT), dureza calcio, dureza magnesio, coliformes totales, coliformes fecales, cloro residual, sólidos disueltos totales (STD) y temperatura.

Adicionalmente en la página web del Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) se reportan indicadores de la calidad de agua subterránea del período de 2012 a 2017 en Cozumel para cinco pozos. Las variables indicadoras de calidad de agua consideradas por el SINA son: alcalinidad total, CE, STD (medidos y riego agrícola), salinización, fluoruros totales, DT, coliformes fecales, nitrógeno de nitratos (N-NO₃⁻), arsénico total, cadmio total, cromo total, mercurio total, plomo total y manganeso total (SINA, 2019).

En la Tabla 1, se presenta la información resumida sobre la calidad del agua reportada dentro de UGA C1, la cual se elaboró con 1,704 datos de parámetros fisicoquímicos procedentes de 35 sitios de muestreo (Coronado-Álvarez et al., 2011; Infomex, 2018h, 2018i, 2018j, 2018k, 2018l).

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos de muestras tomadas en UGA C1.

Parámetro	Unidad	Número de observaciones	Parámetro	Unidad	Número de observaciones
Conductividad eléctrica (CE)	mS cm ⁻¹	159	Temperatura	°C	119
pH		159	Cloro residual	mg / l	144
Cloruros (Cl ⁻)	mg / l	158	Oxígeno disuelto (OD)	mg / l	15
Sólidos totales disueltos (STD)	ppm	156	Salinidad	mg / l	15
Dureza total (DT)	mg / l	144	Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg / l	15
Dureza calcio	mg / l	144	Amonio	mg / l	15
Dureza magnesio	mg / l	144	Porcentaje de saturación de oxígeno (PSO)	% Saturación	14
Coliformes Totales (CT)	UFC	144	Clorofila a	mg / m ³	14
Coliformes Fecales (CF)	UFC	144	Profundidad de disco de Secchi	m	1

Finalmente, se ha reportado evidencia por contaminación antropogénica (Cervantes-Martínez et al., 2015), contaminantes emergentes y contaminación asociada con asentamientos irregulares (Koch et al., 2017, 2016); de igual manera, por valores en parámetros fuera de los criterios ecológicos para la protección de la vida acuática marina (Sánchez y Pinto et al., 2015) e intrusión de agua marina en pozos (Zack & Lara, 2003).

1.3 Planteamiento del Problema

En Cozumel, son diversos los problemas asociados con el acuífero. Primero se debe considerar la condición insular cárstica que incrementa la vulnerabilidad del acuífero, por la facilidad con la que contaminantes pueden infiltrarse junto con la precipitación o producto de las actividades humanas (Metcalf et al., 2011; Null et al., 2014). Los principales contaminantes reportados en el acuífero son bacterias coliformes (Koch et al., 2016), contaminantes emergentes (Koch et al., 2017) y nutrientes, como el amonio en cantidades

que superan los límites máximos permisibles planteados para agua potable dentro de la NOM-127-SSA1-1994 (Gutiérrez-Aguirre et al., 2008).

Sumado a esto, también se desconocen los efectos que pueda tener el cambio climático sobre el acuífero insular. En general, en la región del Caribe se espera un aumento de la temperatura de 2 a 3 °C (Hall et al., 2013), un decremento en la precipitación de hasta un 20% (Cashman et al., 2010) y un aumento de 5 a 10 mm del nivel medio del mar por año (Cashman, 2014). Aunque no está claro cuáles serán los efectos específicos sobre Cozumel, debido a que estos pueden variar por localidad, estas modificaciones en las variables hidrometeorológicas podrían influenciar la recarga y la disponibilidad de agua en Cozumel.

En general, el crecimiento poblacional, la rápida urbanización, la alta contaminación en el agua y un aumento en la demanda están ejerciendo presión sobre los recursos hídricos disponibles (Molinos-Senante & Donoso, 2016); por lo que se esperan el incremento de recortes de agua en las comunidades (Long & Pijanowski, 2017) y el número de personas que padecen escasez de agua (Mekonnen & Hoekstra, 2016). Se ha confirmado que la escasez de agua se incrementará significativamente en las siguientes décadas (Fuentes-Bargues, 2014) y que traerá consigo problemas para la seguridad alimentaria, sostenibilidad ambiental y el desarrollo económico (Distefano & Kelly, 2017). En Cozumel se ha observado un crecimiento poblacional promedio de 2.46 % para el periodo 2000-2015 de (INEGI, 2017; SECTUR, 2013, 2018), con lo que se espera un incremento sobre la demanda y un probable incremento en los problemas de acceso al recurso hídrico. Actualmente se ha estimado una población total en la Isla de aproximadamente 86,415 habitantes (INEGI, 2015).

Sumado a el incremento poblacional, las actividades económicas también ejercen presión sobre la disponibilidad del agua. En Quintana Roo el turismo aporta 80% del Producto Interno Bruto (PIB) estatal (Palafox & Segrado, 2008), siendo la principal actividad económica y posicionándolo como uno de los destinos turísticos más importantes en México, desplazando a la actividad agrícola e industrial (Jamal et al., 2010). Las actividades de turismo y hospedaje reportadas para la Isla representaron una derrama económica de \$611.20 millones de dólares en 2015, posicionando al turismo como la principal fuente de ingresos (Segrado et al., 2017). Esta importante derrama económica se relaciona con el arribo anual a la Isla en 2017 de un total de 5, 050,440 de extranjeros por vía marina y 206,720 extranjeros

por el aeropuerto internacional. Aunque actualmente se desconoce la demanda hídrica de los diferentes sectores en la Isla, no existe evidencia que el agua extraída del acuífero no se destine para los turistas y actividades relacionadas con el turismo.

Desafortunadamente la sobre extracción es una consecuencia de la falta de un manejo apropiado en los pozos. Se estima que en Cozumel, aproximadamente el 17% de los 240 pozos de extracción no están activos debido a que se ha acabado la “capa” de agua dulce, por lo que se encuentran en estado salobre y hay que esperar que el proceso natural de captación los restituya (Villegas, 2016). Hasta el momento no se conocen en la Isla otras estrategias para remediar los pozos no activos, más allá de clasificarlos como abatidos o en reposo. Al no contar con información clara sobre los volúmenes de agua para los diferentes sectores, se desconocen los actuales volúmenes de extracción, la recarga total y los volúmenes almacenados en toda la Isla; además de que se requieren actualizar la tasa de extracción óptima y las variaciones en los indicadores hidrometeorológicos. Esto pues, la tasa de extracción optima se estimó de 40 lps (volumen medio anual de 1,300,000 m³) en 1978 (Lesser et al., 1978) y hasta el momento no se han encontrado documentos en donde se actualice; mientras que las estimaciones de recarga del acuífero realizadas por CONAGUA (CONAGUA, 2015a) son anuales, no consecutivas y consideran datos de precipitación no actualizados.

Finalmente, en Cozumel no existen actualmente instrumentos en los cuales se favorezca una participación de los usuarios dentro de las decisiones de manejo del acuífero. Si bien, en la Península se cuentan con el Consejo de Cuenca de la Península de Yucatán (CCPY), en donde se plantean soluciones técnicas, legales y administrativas para asegurar la disponibilidad de las reservas de agua a través de distintas estrategias (CCPY, 2012); actualmente no se cuenta con un homologado para Cozumel.

1.4 Pregunta de investigación

¿Cómo sistematizar la información obtenida y modificar los indicadores ambientales, económicos y sociales, relacionados con el agua subterránea de la isla de Cozumel, para

proponer una metodología integrativa que permita y facilite la gestión sostenible del acuífero de Cozumel en el área de captación?

1.5 Hipótesis

La teoría general de sistemas y el concepto de sistemas socio ecológicos apoyarán en la sistematización de un conjunto de variables y conocimientos obtenidos a través de indicadores modificados a las condiciones insulares sobre el estado actual del acuífero en UGA C1, su entorno ambiental, las actividades económicas dependientes del recurso, servicios de distribución, usos y tradiciones del agua, demografía, aspectos de la salud y jurídicos relacionados con el uso y extracción del agua para su potabilización, para con ello, proponer un modelo de gestión sostenible del acuífero en el área de captación de Cozumel.

1.6 Justificación

La Organización de las Naciones Unidas (ONU), dentro de los objetivos del desarrollo sostenible lo plantea como el Objetivo 6: “Garantizar la disponibilidad del agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos” (UN Water, 2017). En específico, la meta 6.5 establece que al 2030, el implementar la gestión integrada de los recursos hídricos a todos los niveles, incluso mediante la cooperación transfronteriza (ONU, 2021). Esto, pues el agua se considera uno de los recursos más valiosos para las ciudades, aunque no debe ser tomado como un recurso ilimitado, ni ajeno a los efectos de la contaminación y cambio climático (Distefano & Kelly, 2017). Para asegurar la disponibilidad del recurso, es necesario promover que la población comience con la transición hacia un modelo de manejo sostenible. Esto requiere del desarrollo de modelos de gestión del acuífero en los cuales se integren factores ambientales, económicos y sociales.

Desafortunadamente en Cozumel no existe un modelo para el manejo del acuífero. Uno de los principales problemas es la falta de información, mecanismos para generarle y garantizar su accesibilidad. Dentro del presente trabajo se pretende caracterizar y analizar a los elementos relacionados con el acuífero, para que sean las bases que permitan el desarrollo de un modelo para el manejo sostenible del acuífero. La generación y análisis de información

es uno de los pasos más importantes para la planificación e implementación del MIRH, como lo afirma la Asociación Mundial para el Agua (AMA) en 2009. El conocer el consumo por parte de las distintas actividades y grupos de personas, permitirá el desarrollo de estrategias enfocadas para promover prácticas que fomenten un uso más eficiente del recurso hídrico; contribuyendo a disminuir la presión por explotación en el acuífero. Adicionalmente, la caracterización de las dinámicas de los indicadores asociados con la recarga del acuífero, pueden contribuir a mitigar los efectos del cambio climático y la vulnerabilidad del recurso. Con el desarrollo del modelo sostenible para el acuífero, se beneficiaría la población local, las actividades económicas y al ecosistema insular. El modelo producto del análisis de la información podrá ser consultado como una base para priorizar acciones en el sector agua y determinar la realización de objetivos compartidos (Berg, 2016; Lopez-Maldonado & Berkes, 2017), priorizando la disponibilidad de agua en cantidad y calidad, sin comprometer la equidad económica ni la igualdad social. De no atenderla situación actual sobre el manejo del acuífero en la Isla, se espera un incremento de los problemas de disponibilidad y calidad; pues en el actual manejo del agua realizado por CAPA (Infomex, 2018h) no se contemplan: los compuestos con implicaciones para la salud (como los nitritos y nitratos), la integración de usuarios en las decisiones sobre el manejo ni mecanismos de difusión sobre la calidad y cantidad de agua dentro del acuífero.

1.7 Objetivos

1.7.1 Objetivo General

- Desarrollar un modelo de gestión sostenible del acuífero en el área de captación de Cozumel fundamentado en la teoría general de sistemas y el concepto de la teoría de sistemas socio ecológicos, mediante la adecuación de indicadores sobre el estado actual del acuífero en UGA C1, entorno ambiental, actividades económicas dependientes del recurso, servicios de distribución, usos y tradiciones del agua, demografía, aspectos de la salud y jurídicos relacionados con el agua potable.

1.7.2 Objetivos Particulares

- Analizar la información disponible a través de investigación bibliográfica e informantes clave sobre aspectos sociales, económicos y ambientales referentes al acuífero en UGA C1 en la isla de Cozumel.
- Categorizar con un modelo la información recopilada a través de investigación bibliográfica e informantes clave sobre el estado actual del acuífero en UGA C1, el entorno ambiental, el estado del recurso, las actividades socioeconómicas, los servicios de distribución, los usos y tradiciones, marco jurídico y demografía relacionados con el agua, que deban ser considerados en un modelo de gestión sostenible en la isla de Cozumel.
- Adecuar indicadores sobre el estado del acuífero (índice de calidad de agua), entorno ambiental (índice de sostenibilidad de ambientes cársticos), servicios de distribución (tratamiento de agua y costo), usos y tradiciones (consumo de agua) del agua para la isla de Cozumel.
- Determinar el estado actual de la calidad del agua en UGA C1 (índice de calidad de agua), sostenibilidad (índice de sostenibilidad de ambientes cársticos), tratamiento agua residuo, costo, consumo por la población y turismo adecuando indicadores para la isla de Cozumel.
- Integrar la información, obtenida y generada, dentro de un modelo para la gestión sostenible del acuífero Cozumel, fundamentado en la teoría general de sistemas, el concepto de la teoría de sistemas socio-ecológicos y considerando modificaciones a los indicadores sobre el estado actual del acuífero en UGA C1, su entorno ambiental, las actividades económicas dependientes del recurso, servicios de distribución, usos y tradiciones del agua, demografía, aspectos de la salud y jurídicos relacionados con el agua potable.

1.8 Materiales y métodos

A manera de resumen, en la Figura 2 se presenta un diagrama para describir el orden y los pasos seguidos en el presente trabajo.

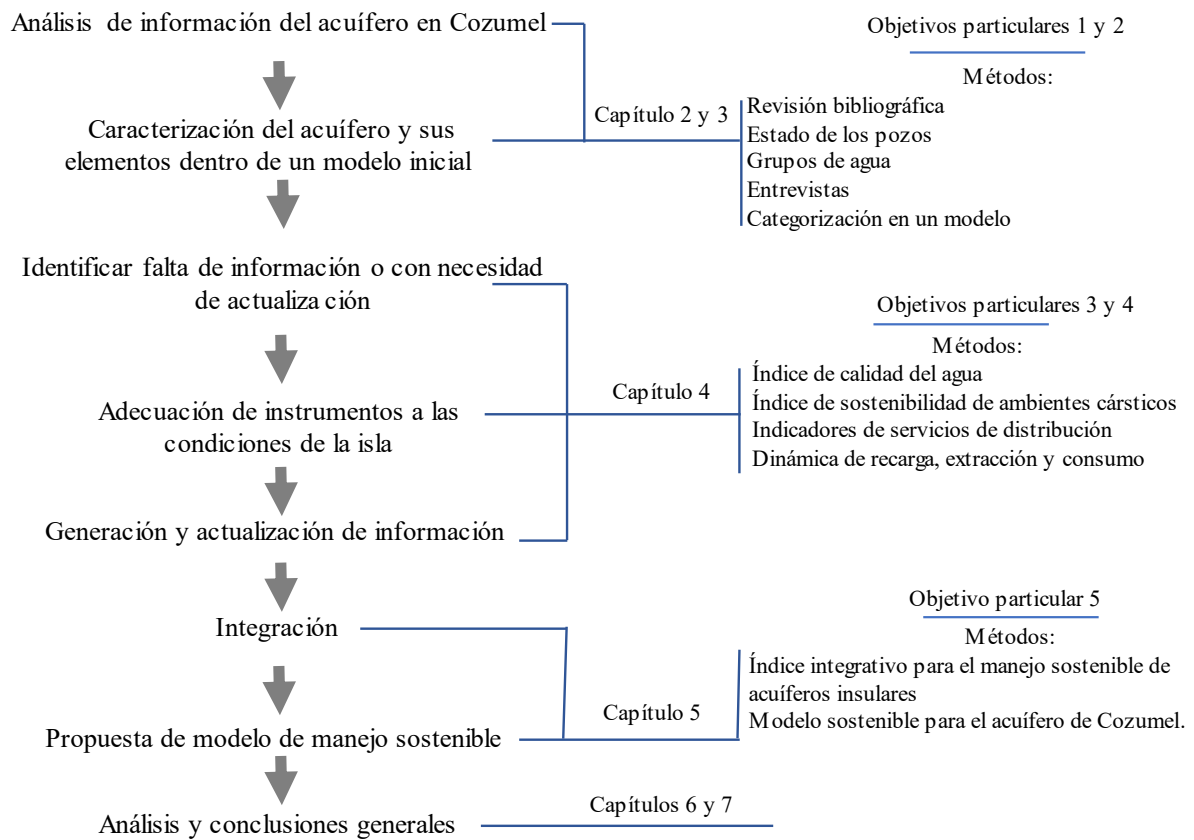


Figura 2. Diagrama sobre las fases de la investigación, capítulos, objetivos y estructura metodológica abordados en el trabajo de tesis (elaboración propia).

1.8.1 Revisión bibliográfica, entrevistas y categorización (Capítulos 2 y 3)

Para propósitos de este trabajo, los términos manejo y gestión serán considerados como sinónimos, pues en reportes de AMA se utilizan ambos de manera similar (AMA, 2000, 2009); además que el concepto de “gestión” no cuenta con equivalente en inglés, traducándose como “management”. Los Capítulos 2 y 3 se enfocan en el análisis de la información disponible sobre el MIRH, el acuífero de Cozumel y los elementos que lo relacionan. En esta primera etapa del trabajo se analizó la información disponible sobre aspectos sociales, económicos y ambientales referentes al acuífero en UGA C1 en Cozumel para generar un diagnóstico de los elementos relacionados con el acuífero basado en la literatura. Para ello, se realizó una revisión de la bibliografía disponible y entrevistas a informantes clave, pues son métodos y herramientas recomendados por diferentes autores en

el estudio del MIRH (AMA, 2009; Conservation Ontario, 2010; Santacruz de León, 2007). Con la finalidad de abarcar los tres ejes del desarrollo sostenible, se revisó: el eje ambiental en donde se hace referencia al agua en los pozos ubicados en UGA C1 y donde se determinaron grupos de agua con base en su calidad. En el eje económico se describieron a las actividades socioeconómicas en la Isla, haciendo énfasis en la agricultura y la industria, que generalmente ejercen mayor presión sobre la calidad y cantidad del agua subterránea (Foster et al., 2015). En el eje social se condujeron entrevistas a sectores de la población para conocer su percepción sobre el recurso hídrico. La información abordada se categorizó dentro de un modelo de aspectos relacionados con el agua en Cozumel y se aborda dentro del Capítulo 3.

Revisión bibliográfica

Para la revisión bibliográfica se realizó una investigación documental de acuerdo con el concepto de Sampieri (Sampieri, 2014). También se tomaron como base los criterios para determinar el estado del arte en el MIRH (Kennedy et al., 2009): buscar y revisar recursos fácilmente disponibles basados en la web y en la literatura relacionados con el MIRH de la región y el acuífero en Cozumel, junto con establecer contacto con personas y entidades con conocimientos en el campo para determinar qué recursos adicionales podrían estar disponibles para su inclusión en la base de datos del proyecto. En el caso de Cozumel, se consultaron documentos relacionados con el acuífero como: trabajos de tesis, publicaciones científicas, manuales, notas periodísticas, libros y reportes de instituciones o grupos de investigación relacionados con el acuífero. Adicionalmente se solicitó información a CAPA, CONAGUA y el municipio de Cozumel a través de la Plataforma Nacional de Transparencia. Los periodos de tiempo considerados se especifican dentro de cada apartado.

Estado de los pozos en UGA C1

Como parte del análisis de información disponible sobre aspectos ambientales, se describió el estado anual de los pozos administrados por CAPA y su ubicación dentro de UGA C1; para ello se tomaron como base los criterios de calidad de agua utilizados por CAPA y que son definidos en el Capítulo 3: activos operando, activos en reposo e inactivos abatidos (Infomex, 2019f). Para ello, se solicitó información a CAPA correspondiente al periodo 2013

al 2018 (Infomex, 2019a, 2019e, 2019c, 2019b, 2019d), misma que se utilizó para elaborar mapas con la ubicación geográfica de cada pozo y su estado utilizando el programa ArcMap 10.5.

Grupos de Agua

Base de datos y revisión bibliográfica

Para analizar la información de la revisión bibliográfica con relación a la calidad del agua en el acuífero, se determinaron grupos de agua con base en variables indicadoras de calidad de agua y complementados con su ubicación. Para ello, se consideró información en documentos de 1978 a 2017 (Carrillo & Milán, 2012; Cervantes-Martínez et al., 2015; Coral, 2015; Coronado-Álvarez et al., 2011; Koch et al., 2017, 2016; Lesser et al., 1978; Wurl et al., 2003; Zack & Lara, 2003). Esta información se sistematizó dentro de una base de datos (BD) en la cual se incluyeron: 78 sitios de muestreo y 10,975 datos de 39 parámetros indicadores de calidad de agua: temperatura, CE, oxígeno disuelto (OD), pH, salinidad, porcentaje de saturación de oxígeno (PSO), profundidad, control fotoperiódico parcial en agua (PAR), referencia de control fotoperiódico parcial en agua (refPAR), profundidad de secchi, Cl⁻, nitratos (NO₃⁻), STD, milivoltios (Mv), clorofila a, amonio, dureza total (DT), bacterias coliformes fecales, dureza de carbonatos, nitritos (NO₂⁻), bacterias coliformes totales, fosfatos, profundidad a nivel del suelo, sulfatos (SO₄²⁻), azufre de sulfatos (S-SO₄), calcio, magnesio, sodio, potasio, flúor, bromo, aluminio, zinc, cromo, cobalto, níquel, cobre, cadmio y plomo. Se elaboró una segunda base de datos (BDCAPA) con únicamente información solicitada a CAPA sobre muestreos mensuales a 90 sitios de muestreo (pozos) en la UGA C1, entre el 2005 y el 2018. En BDCAPA los parámetros indicadores de calidad de agua reportados fueron: CE, Cl⁻, pH, dureza de magnesio, dureza de calcio, STD y DT; sumando un total de 71,105 datos para el periodo mencionado.

Diagrama bivariado

Para elaborar el diagrama bivariado, se aplicó el siguiente criterio de selección a los datos de la BD y BDCAPA: que los sitios y/o puntos de muestreo contaran con información sobre CE y Cl⁻. Cabe aclarar que un sitio de muestreo es un lugar que puede ubicarse mediante coordenadas geográficas (ej. El pozo 1-1 de CAPA: 20.4745° N - 86.9021°O); mientras que

un punto de muestreo se refiere a profundidades o fechas diferentes dentro de un sitio de muestreo (Ej. 3, 6 y 9 m de profundidad en el pozo 1-1 de CAPA o enero de 2005 y enero de 2006 en el pozo 1-1). Después de aplicar el criterio de inclusión a las bases de datos se obtuvo un total de 8,862 puntos de muestreo: 270 de la BD, 8,524 de BDCAPA, 4 de agua de lluvia, 3 de agua de mar y 61 provenientes de muestreos utilizados para calcular el índice de calidad del agua; con los que se elaboró una gráfica en donde se estimó el coeficiente de correlación (r^2). Adicionalmente se elaboró una segunda gráfica removiendo BD, para estimar el r^2 de la UGA C1. En ambas gráficas los resultados se compararon con una línea de tendencia estimada de 80 puntos de muestreo en colectas realizadas en el acuífero norte de Quintana Roo en 2007-2008.

Muestras de agua de mar y lluvia

Se colectó agua de lluvia en tres charolas limpias de plástico (27 x 37 x 5cm) colocadas en la intemperie durante un evento de precipitación el 22 de septiembre de 2020. El agua de mar se colectó a una distancia de aproximadamente 30 metros de la línea de costa y a una profundidad de 5 metros el 23 de septiembre de 2020. En ambos casos el agua se almacenó por triplicado en recipientes de poliuretano con un volumen de un litro. Cada muestra se vertió en un matraz de vidrio en el cual se introdujo el electrodo de una sonda multiparamétrica (YSI Profesional Plus) para medir CE y Cl⁻.

Análisis de agrupamiento

Para determinar los grupos de agua se utilizó la información de la BD, aplicando los siguientes criterios de inclusión a los datos:

- Sitios de colecta con georreferencia.
- Valores de conductividad eléctrica por debajo de los 2,800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, como indicador de análisis de agua dulce aprovechable (Ayers & Westcot, 1976; Gómez et al., 2015).
- Profundidad de muestreo, igual o menor a 5 metros, como indicador de presencia de agua dulce e influencia del acuífero de la Isla.
- Que los puntos de muestreo contaran con las siguientes variables: temperatura ($^{\circ}\text{C}$), saturación de oxígeno disuelto (%), concentración de OD (mg/L), pH, CE, amonio y Cl⁻. Por otra parte, se incluyeron los datos de clorofila a y concentración de nitrato

como N (N-NO_3^-); siempre que éstos se hubieran determinado con fundamento en APHA (1986) y la NOM-AA-079-SCFI-2001, respectivamente. La consideración de estos parámetros de acuerdo con la información en la base de datos, favorece el desarrollo del modelo matemático al evitar que el análisis de datos se realice con menos del 10% de la presencia de “doble ceros”.

Después de aplicar los criterios de selección para el análisis de agrupamiento a BD se obtuvieron 1,244 datos de nueve variables indicadoras de calidad de agua: OD, PSO, temperatura, pH, CE, clorofila a, N-NO_3^- , amonio y Cl^- ; pertenecientes a 140 puntos de muestreo en 31 sitios de muestreo. Debido a que los valores de los parámetros difieren en magnitudes, se transformaron a logaritmo (excepto pH). Después se realizó un análisis de agrupamiento (distancia euclidiana y ligamiento simple) para detectar similitudes en cuanto a la calidad del agua. Adicionalmente se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) para identificar cuáles son los parámetros que describen los grupos que se formaron en el dendograma. El análisis de agrupamiento, el dendograma y el ACP se realizaron con el programa Multivariate Statistical Package (MVSP versión 3.22). Dentro del dendograma se identificaron los grupos de agua y se realizó un mapa con la ubicación de cada sitio de muestreo para cada grupo. Los valores de cada una de las variables se sometieron a un análisis estadístico mediante la prueba de Kruskal-Wallis (con un nivel de significancia de 0.05) para identificar si existían diferencias significativas entre las medianas de los grupos. El programa utilizado para las pruebas estadísticas fue SPSS (IBM SPSS Statistics Subscription Versión 26). Posteriormente se realizó un análisis de Dunn con la corrección de Bonferroni para identificar las diferencias significativas entre grupos.

Entrevistas.

Se realizaron entrevistas semi estructuradas para identificar la percepción de diferentes sectores de la población con relación al recurso hídrico, tomando como referencia la propuesta de Santa Cruz de León (2007). De acuerdo con Sampieri (2014), este tipo de entrevistas se basan en una guía de asuntos o preguntas y el entrevistador tiene la libertad de introducir preguntas adicionales para precisar conceptos u obtener mayor información. Con los primeros acercamientos sobre el agua dulce en Cozumel, se identificó que la población

en general contaba con una opinión dividida sobre la cantidad y calidad del agua. Esto es, había un grupo de personas que aseguraban que el agua en la Isla es suficiente y de buena calidad y otro grupo que opinaba lo contrario. Esto nos llamó la atención, pues en la revisión bibliográfica se identificó información escasa y de difícil acceso sobre el estado del acuífero, trabajos que describieran el costo del servicio de distribución, problemáticas y consumo. Por ello, la entrevista se consideró como un acercamiento metodológico que permitiría conocer la percepción de diferentes grupos sobre la calidad y cantidad de agua en la Isla, las fuentes de información en las cuáles basan su percepción, el costo por el servicio, problemática y sectores que (de acuerdo con su experiencia) consumen más agua. Se buscó que los entrevistados fueran representativos de cada sector y que realizaran actividades relacionadas con el acuífero insular, considerando a los sectores: académico, asociaciones civiles e iniciativa privada. Los criterios para la selección de académicos fueron: residir en la Isla por más de diez años y trabajar en un área relacionada con el acuífero del ambiente insular. Para la selección de entrevistados en asociaciones civiles: residir en Cozumel, contar con una asociación civil enfocada en el ambiente insular y el agua dulce. Para la selección de iniciativa privada: residir en la Isla, que la empresa tenga un impacto sobre el consumo, uso o distribución del agua dulce en la Isla. El número de entrevistados fue bajo debido al reducido número de personas que cumplían con los criterios en cada sector, influyendo el “bajo número de habitantes” y de personas que se relacionan directamente con el acuífero. Además se presentaron casos de entrevistados que no accedieron a colaborar con el estudio. Para las entrevistas se utilizó el instrumento del Anexo 1. En caso de ser solicitado, el cuestionario se les envió previo a la entrevista. Las entrevistas se llevaron a cabo con el consentimiento de cada entrevistado y asegurando su anonimato, dentro de un espacio cerrado y bajo previo acuerdo. Cada una de las entrevistas se grabó y el archivo de audio se utilizó para transcribirlas dentro de un archivo de texto, con lo que se ubicaron las partes referentes a: percepción de diferentes grupos sobre la calidad y cantidad de agua en la Isla, las fuentes de información en las cuáles basan su percepción, el costo por el servicio, problemática y sectores que (de acuerdo con su experiencia) consumen más agua. Cada uno de estos elementos se identificó dentro de los discursos y se analizó para comparar las respuestas entre entrevistados de diferentes sectores. En la discusión se abordó la percepción

de los entrevistados sobre los temas y se contrastó con la información bibliográfica analizada.

Categorización en un modelo inicial de aspectos relacionados con el recurso hídrico

Se categorizó la información obtenida de la revisión bibliográfica y las entrevistas dentro de un modelo inicial sobre los aspectos relacionados con el recurso hídrico. El modelo se fundamenta en elementos abordados por la sostenibilidad, SSE y el manejo de acuíferos descritos en trabajos previos (Bonacci, 2010; Chakraborty, 2010; Juwana et al., 2012, 2016; Kang et al., 2017; Kent et al., 2002; Labuschagne et al., 2005; Liehr et al., 2017; Ness et al., 2007; Pellicer-Martínez & Martínez-Paz, 2016; Saravanan, 2008; Shrestha et al., 2016; Singh et al., 2012; Vrba et al., 2007; WRC, 2011), considerando los ejes del desarrollo sostenible: ambiental, económico y social; con siete categorías repartidas entre los ejes. La categoría ambiental considera al entorno ambiental y el estado del recurso con indicadores que describen al acuífero, junto con las características del área. Las categorías económicas se dividieron en: actividades socioeconómicas y servicios de distribución, con lo que se caracterizan los sectores económicos y la red de distribución de agua potable junto con el sistema de drenaje. Finalmente, en la categoría social se consideran los usos y tradiciones, el marco jurídico y demográfico asociado con el acuífero. En general estas categorías e indicadores son utilizadas para la caracterización de información sobre el área de estudio dentro de SSE y el MIRH, pues en estas teorías se contemplan: actividades económicas, tecnologías, normatividad, equidad de los servicios, características biofísicas, calidad y cantidad de agua, uso del recurso, extracciones, descargas y aspectos demográficos (AMA, 2009; McGinnis & Ostrom, 2012). El modelo inicial de aspectos relacionados con el recurso hídrico contribuye con el modelo sostenible del acuífero al ser una herramienta útil para la categorización de información en Cozumel.

1.8.2 Generación y actualización de información (Capítulo 4)

El análisis de la información disponible sobre el acuífero y los elementos con los que se relaciona permitió identificar la necesidad de actualizar información. Para ello, dentro del Capítulo 4 se adecuaron herramientas metodológicas a las características de Cozumel, para

con ello generar información sobre la calidad del agua en UGA C1 (índice de calidad de agua), avance de prácticas hacia la sostenibilidad (índice de sostenibilidad de ambientes cársticos), tratamiento del agua residual, costo, consumo por la población y turismo.

Índice de Calidad del Agua (ICA)

El monitoreo de la calidad de los recursos hídricos es una de las actividades más importantes para el MIRH (AMA, 2009; Castro et al., 2015). Por ello, para complementar la información resultado del análisis de trabajos previos sobre la calidad del agua abordada en el Capítulo 3; dentro del capítulo 4 se estimó un ICA con información obtenida de muestreos realizados en Octubre 2019. Para el ICA en Cozumel, se tomó como referencia el trabajo de Sánchez y colaboradores (Sánchez et al., 2016), en donde se midieron siete parámetros químicos de calidad del agua (pH, STD, DT, Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ y NO₃⁻) con los métodos descritos dentro de la normatividad mexicana (NMX-AA-034-SCFI-2001, NMX-AA-072-SCFI-2001, NMX-AA-051-1981, NMX-AA-073-SCFI-2001, NMX-AA-074-SCFI-1981 y NOM-AA-079-SCFI-2001).

El índice de calidad del agua original se adecuó para que reflejara las condiciones de la calidad del agua en Cozumel y con ello sea un instrumento óptimo para el monitoreo en el acuífero de UGA C1. Para estas adecuaciones se consideraron parámetros medidos en trabajos previos (Coral, 2015; Guitiérrez-Aguirre et al., 2008; Lesser et al., 1978; Scholz, 2006), límites máximos permisibles descritos en la NOM-127-SSA1-1994 (Secretaría de Salud, 1996) y parámetros abordados por CAPA en pozos dentro de la UGA C1 (Infomex, 2018e). Además, se incluyeron nuevos parámetros al índice con base en la accesibilidad, facilidad para su estimación y considerando su utilización en un monitoreo futuro. Por ello, las variables indicadoras del ICA dentro de este estudio fueron: pH, temperatura, OD, salinidad, CE, STD, Cl⁻, DT, SO₄²⁻, NO₃⁻ y NO₂⁻.

Junto con los muestreos de pozos en octubre de 2019, se realizó una actualización al estado de algunos pozos tomando como criterio problemáticas observadas: 1) inaccesibilidad por exceso de vegetación, 2) ausencia de equipo de bombeo, 3) ausencia de infraestructura eléctrica para el funcionamiento del equipo de bombeo. Esta actualización en la que se utiliza

una clasificación de pozos basada en problemáticas observadas (Figura 15) complementa a la clasificación de pozos con base en su calidad de agua.

Muestreos

El sitio de muestreo para el ICA se ubicó en la UGA C1 (Figura 1), dentro de la batería de pozos. De los 261 pozos existentes que administra CAPA, sólo se consideraron los 116 que se encuentran en estado “activo”. Para determinar un tamaño de muestra significativa, se utilizó la ecuación (1) propuesta por Murray y Larry (Murray & Larry, 2009):

$$n = \frac{\sum \alpha^2 * N * p * q}{i^2 (N - 1) + \sum \alpha^2 * p * q} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

n = tamaño de la muestra.

N = tamaño de la población.

Z = Valor correspondiente a la distribución de Gauss $Z_{\alpha=0.5}=1.96$ y $Z_{\alpha=0.05}=2.58$.

P = Prevalencia esperada del parámetro a evaluar, en caso de desconocerse $P=0.5$.

q = 1-p.

i = Error que se prevé cometer (usualmente entre 0.01 a 0.05).

Con la fórmula se estimó un total de 89 pozos que debían ser muestreados dentro de la UGA en la temporada de lluvias del 21 al 25 de octubre del 2019 (Figura 3). Debido a que el número de pozos activos entre los diferentes ejes no era homogéneo, se optó por seleccionar un número proporcional al total de pozos por eje, resultando 20, 10, 18, 22 y 20 pozos para los ejes 1 al 5 respectivamente. Los pozos por muestrear en cada eje se seleccionaron de manera aleatoria y se identificaron con dos dígitos separados por un guion. El primer dígito corresponde con el número del eje y el segundo dígito con el número del pozo.

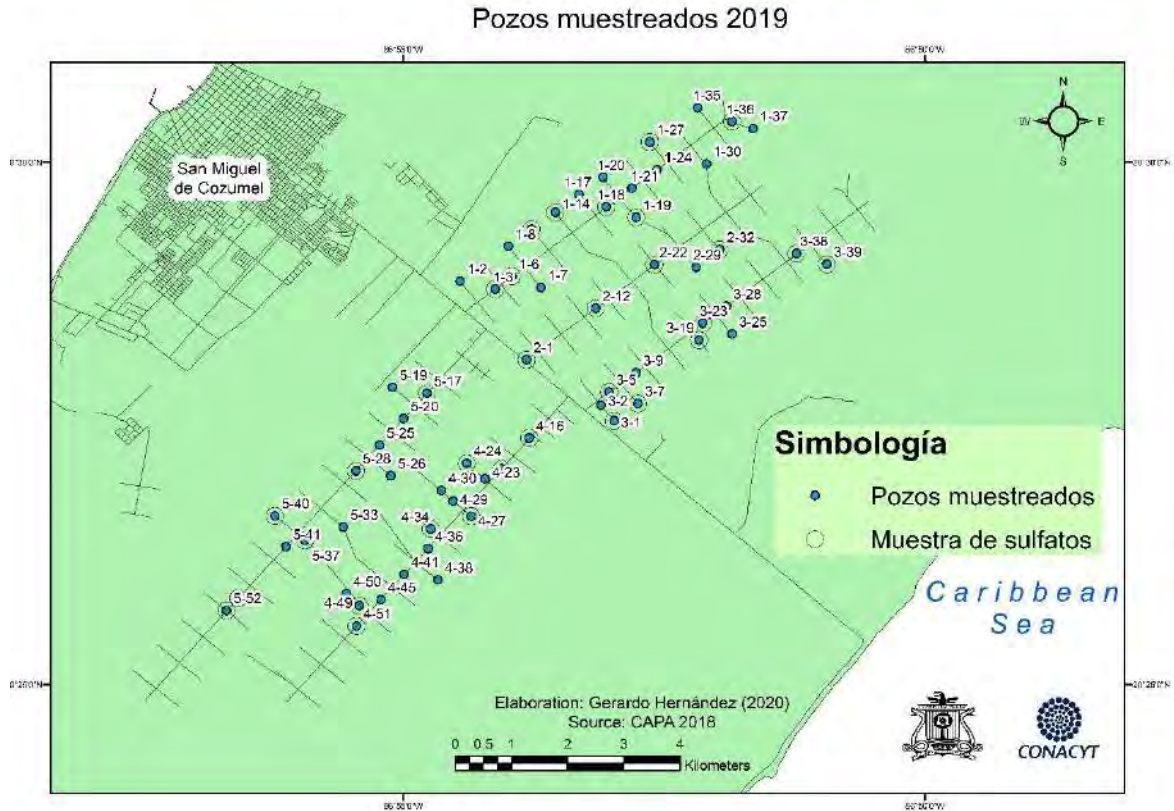


Figura 3. Pozos muestreados en este estudio.

Las muestras se colectaron de la “llave de recolecta” ubicada en cada pozo, de los cuales se extrae agua de una profundidad de 6 metros. Se utilizaron recipientes de polietileno con un volumen de 10, 1 y 0.25 litros para el análisis y transporte de muestras de cada pozo, los cuales fueron previamente tratados de acuerdo con lo establecido en la NOM-014-SSA1-1993.

Las mediciones *in situ* se realizaron al sumergir los electrodos de la sonda multiparamétrica (YSI Profesional Plus) en un recipiente con 10 litros de agua de pozo. Con la sonda multiparamétrica (previamente calibrada) se determinó: pH, temperatura (°C), OD (mg/L), salinidad (ppm), CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$), STD (mg/L) y Cl^- (mg/L).

Para el análisis de muestras *ex situ*, se llenaron recipientes de polietileno con un volumen de 1 y 0.25 litros previamente tratados para evitar la contaminación en las muestras y enjuagados 3 veces con agua del pozo. Los recipientes con las muestras se almacenaron en una hielera,

para ser procesadas el mismo día. Las variables indicadoras de calidad de agua analizadas *ex situ* fueron: DT (mg/L), SO_4^{2-} (mg/L), N-NO_3^- (mg/L) y N-NO_2^- (mg/L).

La cantidad de nitritos y nitratos se determinó mediante el método de reducción con cadmio cuperizado, de acuerdo con la Norma Mexicana NMX-AA-079-SCFI-2001 (Secretaría de Economía, 2001) en la Universidad de Quintana Roo, Unidad Académica Cozumel. La determinación de dureza total se realizó en el laboratorio de calidad de agua de CAPA dentro de las instalaciones de la estación de regulación “base 1”. Los sulfatos fueron determinados por el método turbidimétrico descrito en la NMX-AA-074-SCFI-2014 (Secretaría de Economía, 2014) realizados por el laboratorio de ensayo “Q.F.B. MANUEL ARMANDO COMAS BOLIO”, acreditado por EMA A.C., para los parámetros indicados en el escrito No. AG-038+009/11. Vigencia a partir del 2011-10-9 y aprobado por CONAGUA según el documento CNA-GCA-2057 (con vigencia de veinticuatro meses a partir del 17 de mayo del 2019).

Cálculo del ICA

Para estimar el ICA se utilizó el método descrito por Pacheco y colaboradores (2016). A cada uno de los parámetros se les asignó una ponderación (w_i) con base en su importancia. La ponderación se fundamentó en la relevancia de los parámetros medidos de acuerdo con la importancia para describir la calidad del agua y su impacto sobre la salud pública descritos dentro de la NOM.

El peso relativo de cada parámetro de acuerdo con la ecuación 2:

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=0}^n w_i} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde W_i es la ponderación relativa, w_i es el peso de cada parámetro y n es el número de parámetros.

El peso de cada parámetro, su ponderación relativa, sus valores de referencia y la fuente con la cual se consideraron se muestran en la Tabla 2:

Tabla 2. Peso de cada parámetro, ponderación relativa y límites utilizados dentro del ICA.

Parámetro	Unidad	Ponderación (wi)	Wi	Valores de referencia		
				Mínimo	Promedio	Máximo
STD	mg/L	5	0.16		-	1000 ⁿ
N-NO ₃ ⁻	mg/L	5	0.16		-	10 ⁿ
N-NO ₂ ⁻	mg/L	4	0.13		-	0.05 ⁿ
Cl ⁻	mg/L	3	0.10		-	250 ⁿ
CE	μS/cm	3	0.10		-	3000 ^r
SO ₄ ²⁻	mg/L	3	0.10		-	400 ⁿ
Salinidad	ppt	2	0.06		-	2.9 ^t
OD	mg/L	2	0.06		-	7.1 ^t
DT	como CaCO ₃	2	0.06		-	500 ⁿ
Temperatura	°C	1	0.035	21 ^{a, c, y t}	25.6 ^{a, c, y t}	29.9 ^{a, c, y t}
pH		1	0.035	6.5 ⁿ	7.3 ^{a, c, y t}	8.5 ⁿ

n = NOM-127-SSA1-1994. t = Muestras en este estudio
r = (Ayers & Westcot, 1976; Gómez et al., 2015).

c = BDCAPA

a = Scholz, 2006.

Se realizó una escala de la valoración de la calidad para cada parámetro de acuerdo con la ecuación 3:

$$qi = \frac{Ci}{Si} * 100 \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde qi es la calificación de la calidad, Ci es la concentración de cada parámetro químico en cada muestra de agua y Si es el valor máximo en la tabla 2.

En el caso del pH y temperatura se hicieron modificaciones a la fórmula original para estimar qi. En ambos casos y con base en muestreos previos, se estableció un valor mínimo, promedio y máximo. La puntuación se obtuvo al calcular la cercanía del valor medido con el valor máximo o mínimo establecido, tomando como valor inicial el valor promedio.

Para la temperatura se establecieron los límites mínimos(mit) y máximos(mat); además de un promedio (prt). Estos valores se estimaron con información obtenida de los muestreos en este trabajo, muestreos de pozos por CAPA y de otros autores, especificados en la Tabla 2. Para el cálculo de temperatura en el ICA, se estableció el valor promedio como el valor

inicial, donde q_i se estimó mediante la siguiente modificación a la ecuación originalmente propuesta por Pacheco y colaboradores (2016):

Si $vt > prt$, entonces se aplica la ecuación 4a:

$$q_i = \left(\frac{vt - prt}{mat - prt} \right) * 100 \quad (\text{Ecuación 4a})$$

Si $vt < prt$, entonces se aplica la ecuación 4b:

$$q_i = \left(\frac{prt - vt}{prt - mit} \right) * 100 \quad (\text{Ecuación 4b})$$

Donde vt es el valor de temperatura para cada sitio de muestreo.

Se estableció para el pH un límite mínimo (mip), valor promedio (prp) y límite máximo (map). Estos valores se estimaron con información obtenida de la NOM-127-SSA1-1994, muestreos en este trabajo, muestreos de pozos por CAPA y de otros autores, especificados en la Tabla 2. Dado que el pH se expresa en una escala logarítmica, se estimó el logaritmo inverso para cada valor, obteniendo la concentración de iones (H^+) dentro de una escala lineal. Después se estableció el prp como el valor inicial, donde q_i se estimó mediante la siguiente modificación a la ecuación descrita originalmente por Pacheco y colaboradores (2016):

Si $vp < prp$, entonces se aplica la ecuación 5a:

$$q_i = \left(\frac{prp - vp}{prp - map} \right) * 100 \quad (\text{Ecuación 5a})$$

Si $vp > prp$, entonces se aplica la ecuación 5b:

$$q_i = \left(\frac{vp - prp}{map - prp} \right) * 100 \quad (\text{Ecuación 5b})$$

Donde vp es el valor de (H^+) para cada sitio de muestreo.

Para calcular el ICA se determinó el S_{li} usando la ecuación 6:

$$S_{li} = (w_i) * (q_i) \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde S_{li} es el subíndice de cada parámetro y q_i es la calificación de la calidad como se explica en la ecuación 7:

$$ICA = \sum S_{li} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Finalmente, los valores obtenidos se clasificaron dentro de la siguiente escala: excelente (< 50), buena (de 50 a < 100), pobre (de 100 a < 200), muy pobre (200-300) y no apta para consumo humano (> 300).

Índice de sostenibilidad de ambientes cársticos (ISAC)

Para evaluar el estado de avance de las prácticas hacia la sostenibilidad en el ambiente cárstico de Cozumel, se tomó como base el Índice de Sostenibilidad de Ambientes Cársticos (ISAC) propuesto por Van Beynen y colaboradores (Van Beynen et al., 2012). El ISAC se divide en 3 dominios: social, ambiental y económico; donde en cada uno se cuenta con un grupo de indicadores que se enfocan en determinar el nivel de progreso hacia la sostenibilidad. Las variables del índice pueden ser aplicadas en cualquier región cárstica del mundo, son fácilmente medibles y no requieren de trabajo en campo, haciendo del ISAC una herramienta efectiva con relación a su costo. El resultado del índice se expresó en uno de tres criterios: objetivo alcanzado, progresando hacia el objetivo y sin mejoramiento o regresión del objetivo. Se tomaron como referencia los valores objetivos y métodos de estimación descritos en el índice original, la tabla con estos valores y el índice original se pueden consultar en el Anexo 2. Los valores objetivo originales se conservaron para la mayoría de los indicadores, además de proponer nuevos indicadores con sus respectivos valores objetivo. El índice se modificó para que reflejara algunas de las prácticas actuales relacionadas con el manejo y aprovechamiento del acuífero, dentro del contexto general de las prácticas hacia la sostenibilidad en ambientes cársticos; por lo que se agregaron y se removieron algunos indicadores. A cada indicador se le asignó una clave de acuerdo con el eje del desarrollo

sostenible en el que se encuentran: Ambiental (En), Social (S) y Económico (Ec), además de contar con un número. El ISAC coincide con las variables de primero y segundo nivel de un SSE (Mcginis & Ostrom, 2012) y al evaluar las prácticas dentro del territorio insular, se consideran las variables que no se relacionan directamente con el acuífero pero que influyen sobre su estado indirectamente; como la propiedad del territorio (S1), el estado de las zonas aledañas a los cenotes (En4) y el área forestal sostenible (Ec3), por lo que su análisis complementa al modelo sostenible del acuífero en Cozumel.

Se realizaron adecuaciones al índice original, a continuación se mencionan cada una por el eje social, ambiental y económico:

- Dominio social

El indicador S5 fue modificado para reflejar el porcentaje de acceso a recursos de hablantes nativos y S6 la participación de universidades y centros educativos en la divulgación de información del acuífero de carst. Dentro del dominio se adicionaron tres indicadores, del S8 a S10. Según Van Der Zaag y Savenije (2014a) y la AMA (2000), la participación de las partes interesadas es un elemento importante en todos los niveles para los procesos de toma de decisiones. Para que esto suceda, se debe promover la integración de usuarios y grupos de interés al menos una vez al año, permitiendo conocer las actualizaciones del estado del acuífero e incorporarlas a las estrategias de manejo; siendo abordado dentro del indicador S8. Consideramos que el que los eventos de integración se realicen una vez al año, puede ser un primer paso, pues actualmente no existen. El indicador S9 toma en cuenta aquellas prácticas que conlleven un ahorro del recurso en usuarios domésticos, por ser el sector con el mayor consumo por volumen de acuerdo con información de este trabajo. En un escenario ideal, todos los hogares en la Isla deberían contar con prácticas para el ahorro del agua, por lo que se planteó un valor objetivo de 100% para este indicador. Finalmente, en el indicador S10 fue importante considerar las tendencias del volumen de consumo por los diferentes sectores en Cozumel, debido a la disponibilidad limitada de agua dulce. Idealmente, estas tendencias deberían mostrar un decremento en el consumo de agua o al menos ser estables (sin tendencia), por lo que se fijaron sin tendencia o estables como el valor objetivo. Cabe destacar que para estimar este indicador se deben contemplar las tendencias de cada sector y de encontrarse una en incremento, no se considera alcanzado el objetivo. El indicador S4 del

índice original “Porcentaje de población desplazada por el desarrollo del paisaje cárstico” se eliminó debido a la ausencia de la inundación de los valles para la construcción de presas o canteras a gran escala.

- Dominio ambiental

Para este dominio, se crean nuevos indicadores (En11 a En13). Debido a la disponibilidad limitada de agua dulce y los posibles efectos de una sobre extracción, es necesario mantener registros anuales de la recarga estimada del acuífero, como se sugiere en En11. Además, actualmente se desconocen los efectos a nivel local o el conjunto de efectos que puedan provenir del cambio climático sobre los volúmenes de recarga de acuíferos en islas, por lo que es indispensable el monitoreo anual de la recarga. Por esto, se fijó como objetivo que al menos se realice el monitoreo o una estimación de recarga por año. En el indicador En12 se describe el estado en el que se encuentra el acceso a los pozos de extracción y los problemas de infraestructura en los pozos, al considerar el crecimiento excesivo de vegetación o el vandalismo. Esto permitirá la planificación estratégica anual para el monitoreo de todos los pozos en UGA C1. Se planteó un escenario donde no se presenten problemas estructurales o de accesibilidad, por lo que se incentiva la buena práctica del monitoreo y mantenimiento; estableciendo un valor objetivo de 0%. Finalmente, de acuerdo con las recomendaciones de la AMA, un marco legislativo en la gestión del agua es necesario para promover la implementación del MIRH (GWP, 2000). Por tanto, en En13 se plantea como objetivo que el 100% de la cuenca hidrográfica se encuentre bajo protección legislativa como parte de las buenas prácticas hacia la sostenibilidad. En esta sección se eliminó el indicador En10 del índice original “Seguimiento del estado de las cuevas muy utilizadas” pues la mayoría de los cenotes en Cozumel no están abiertos, no son de fácil acceso al público ni están siendo monitoreados.

- Dominio económico

Para este dominio, se crearon nuevos indicadores (Ec5 a Ec7). El indicador Ec5 aborda el porcentaje de establecimientos comerciales que han adoptado algún tipo de medida o práctica de conservación de agua (captación de agua de lluvia, reductores de caudal en duchas y volumen en sanitarios, etc.). Dado el limitado territorio y volumen del acuífero en una isla, se planteó como objetivo que el 100% de los establecimientos adoptaran medidas de

conservación de agua como parte de prácticas hacia la sostenibilidad. El indicador Ec6 se centra en el volumen de agua extraída de UGA C1 que se ha perdido debido a fugas. Las fugas son uno de los principales problemas relacionados con el agua, pues representan una pérdida económica y del recurso, además de reducir el volumen disponible para el aprovechamiento de los usuarios. Se fijó el objetivo de contar con un volumen de agua perdido en fugas menor al 10%, pues esto incentivaría buenas prácticas de monitoreo del servicio por parte de CAPA y en hogares. En el indicador Ec7 se aborda el empleo local en el suministro de agua. Parte de las prácticas para adquirir conciencia sobre el valor del recurso hídrico, es que la gente se involucre en el manejo del mismo, en especial los habitantes (locales). Por ello, se consideró que un valor objetivo de >80% de empleados locales dentro de la provisión de agua podría contribuir a incentivar conciencia sobre el recurso y promover buenas prácticas para la sostenibilidad. En este apartado se eliminaron del índice original a: “Ec1 Canteras comerciales abandonadas o minas que han sido recuperadas” pues si bien existe cierta extracción y trituración de material rocoso, cuya producción ronda los 6 millones de toneladas para exportación, estos sitios están activos y no se han abandonado; junto con Ec3 “Aumento de la eficiencia del agua para la agricultura (\$ / consumo)” debido a la baja practica de la agricultura en Cozumel.

Indicadores de servicios de distribución

Dentro de las metas para el 2030 sobre el agua, saneamiento e higiene (WaSH) se ha considerado el tratamiento adecuado de los desechos humanos, que incluye al agua residual (WHO & UNICEF, 2017), mismo que es una parte importante dentro del MIRH en América Latina y el Caribe (Biswas, 1998). En aspectos socioeconómicos, el costo del agua y consumo por día de los usuarios son instrumentos utilizados para evaluar la sostenibilidad del recurso en diferentes casos de estudio (Deyà-Tortella et al., 2017; González et al., 2020; Gössling et al., 2012; LaVanchy, 2017; López-Morales & Duchin, 2011; Molinos-Senante & Donoso, 2016; UNICEF Pacific, 2018). Como parte de la evaluación de elementos ambientales, sociales y económicos en la Isla utilizados en el MIRH, se estimó el volumen de agua residual tratado, el costo por metro cúbico de agua y el consumo diario por usuario con base en los indicadores propuestos por Cervera (2007).

Aguas residuales

Para estimar el volumen de aguas residuales que son tratadas en la Planta de Tratamiento “San Miguelito” fue necesario adecuar la ecuación 8, asumiendo que el volumen facturado por el total de los sectores a los cuales distribuye CAPA era igual al volumen de aguas residuales generado. La información sobre el volumen mensual de agua residual tratado y el volumen mensual de agua generado por cada sector dentro del periodo 2005 a 2018, fueron solicitados a CAPA (Infomex, 2019l, 2019j, 2019k, 2019h, 2019i, 2019g).

$$ART = V_{tart} / V_{ar} \times 100 \quad (\text{Ecuación 8})$$

Variables

- V_{tart} = Volumen total de aguas residuales tratado expresado en litros por segundo (L/s).
- V_{ar} = Sumatoria del volumen consumido total reportado para cada sector (doméstico, hotelero, industrial, servicios generales y comercial) expresado en litros por segundo (L/s).

Precio del agua

El precio del agua en México difiere de acuerdo con el volumen consumido y el sector al cual es distribuido. De acuerdo con el Artículo 7 de la “Ley de cuotas y tarifas para los servicios públicos de agua potable y alcantarillado, tratamiento y disposición de aguas residuales del estado de Quintana Roo”, el monto de las cuotas y tarifas se actualiza mensualmente de manera proporcional al índice de precios al consumidor publicado por el INEGI en el Diario Oficial de la Federación (Periódico Oficial del Estado de Quintana Roo, 2013). El indicador se adecuó para abarcar a los cinco sectores presentes en Cozumel: doméstico, comercial, industrial, hotelero y servicios generales a la comunidad. En el indicador se adecuó la ecuación original para que Tar_{min} corresponda con el primer y Tar_{max} con el último bloque de precios por sector, como se observa en la ecuación 9. Se utilizó la información proporcionada por CAPA sobre el costo del metro cúbico de agua para los cinco sectores de usuarios presentes en Cozumel (CAPA, 2020) correspondiente con el mes de Febrero 2020 (Anexo 3).

$$\text{Precio del agua} = (Tar_{max} + Tar_{min}) / 2 \quad (\text{Ecuación 9})$$

Variables

- Tarifmin = Tarifa mínima del agua potable por sector por metro cúbico. Esta variable corresponde al rango de consumo del primer bloque por sector en metros cúbicos por mes.
- Tarifmax = Tarifa máxima del agua potable por sector por metro cúbico. Esta variable corresponde al rango de consumo del último bloque por sector en metros cúbicos por mes.

Consumo de agua por usuario

La información sobre el número de usuarios activos por sector (doméstico, comercial, industrial, hotelero y servicios generales a la comunidad) y el volumen mensual consumido por cada sector fueron solicitados a CAPA para el periodo 2005-2018 (Infomex, 2019l, 2019j, 2019k, 2019h, 2019i, 2020a, 2020b, 2020d, 2020c, 2020e). Dentro de la ecuación original, se plantea una relación entre el total de volumen facturado sobre el número total de habitantes, asumiendo que la única fuente de acceso de la población al servicio de agua es a través de la red de distribución. Con base en los resultados de entrevistas e informantes en este trabajo, se concluyó que la totalidad de los habitantes no son usuarios activos de CAPA, por lo que no reciben agua de la red de distribución. Algunos manifestaron el satisfacer sus necesidades de agua (excepto para beber), a través de la extracción del recurso por pozos artesanales o tecnificados. Esta práctica de complementar o sustituir el servicio de CAPA con agua de pozo particular también se observó en empresas, por lo que se asume que usuarios de los diferentes sectores incurren en la práctica. Por ello, el consumo facturado por CAPA no refleja el consumo real por el total de la población en la Isla. Dentro de la adecuación de la fórmula a las condiciones de Cozumel, se sustituyó al número total de habitantes por el número de usuarios activos por año de los diferentes sectores que estuvieran inscritos a CAPA. De esta manera se procura tener un estimado más acertado sobre el consumo por cada usuario de cada sector.

La ecuación 10 indica:

$$CA = V_{afl} / T_{uaa} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Variables

- $V_{afm}^3/\text{año}$ = Volumen de agua anual facturado por sector en metros cúbicos.
- $V_{afl}/\text{día}$ = Volumen de agua anual facturado por sector en litros por día.
- T_{uaa} = Total de usuarios activos (por sector) en un año.

Dinámica de recarga del acuífero, extracción y consumo

Actualmente se han evidenciado los efectos del cambio climático dentro de la Península de Yucatán a través de un aumento en la temperatura y una alteración en los patrones de precipitación, impactando la recarga de sus acuíferos (Rodríguez-Huerta et al., 2019a). Si bien se pueden hacer predicciones, los efectos reales dependerán de las características regionales, pudiendo ser más graves en islas del Caribe (Neeti et al., 2012; Taylor et al., 2012); enfatizando la necesidad de monitoreo y análisis local de indicadores hidrometeorológicos (CERMES, 2018). Complementariamente, se requiere de monitoreos sobre los volúmenes de extracción y la demanda del recurso como base para un manejo sostenible del acuífero (Ekwue, 2010; Sophocleous, 2000).

Para este estudio, se analizaron tres conjuntos de datos de diferentes períodos de tiempo, considerados en función de la disponibilidad de la información. La información mensual de los indicadores hidrometeorológicos (precipitación total y temperatura media) de 30 años (1989 a 2019) fue proporcionada por CONAGUA desde la estación meteorológica DGE 00,023,048 (20.5100 ° N - 86.9461 ° W) dentro de Cozumel. La mayoría de las lecturas de la estación meteorológica estaban disponibles, por lo que los datos mensuales faltantes se obtuvieron de los informes del Sistema Reanálisis de Predicción Climática (CFSR) y de los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP) con la estación meteorológica ubicada a 20.583 ° N, -86.817 ° W.

Por otra parte, CAPA proporcionó datos mensuales de indicadores hidrológicos de agua (volúmenes de extracción de pozos en UGA C1 y volúmenes de distribución a diferentes sectores) durante un período de 13 años (2005 a 2018).

Evapotranspiración

La evapotranspiración se estimó mediante el método Thornthwaite (Tw), un método mensual basado en la temperatura que se ha utilizado en estudios previos para la Península de Yucatán (Bautista et al., 2009; Delgado et al., 2011). Tw se puede utilizar en lugares donde los datos ambientales son limitados y permiten identificar variaciones mensuales durante un período de tiempo (Bautista et al., 2009). Para este estudio, se utilizaron datos de CONAGUA, CFS

y horas de sol teóricas para cada mes de Allen et al. (1998) para estimar la evapotranspiración mensual (ET_0) de 1989 a 2019 según la ecuación 11 descrita por el método de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948):

$$ET_0 = 16 * \left(\frac{10 * T_m}{I} \right)^\alpha * \frac{N}{12} * \frac{n}{30} \quad (\text{Ecuación 11})$$

donde T_m es la temperatura media del aire para cada mes ($^{\circ}C$), I es el índice de calor anual $\sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_m}{5} \right)^{1.514}$ $\alpha = 6.7512 * 10^{-7} * I^3 - 7.711 - 10^{-5} * I^2 + 1.7921 * 10^{-2} * I + 0.49239$, N son las horas de sol teóricas para cada mes considerando una latitud de 20° en el hemisferio norte (Allen et al., 1998) y n es el número de días por mes.

Recarga estimada

La recarga estimada del acuífero en Cozumel se calculó de acuerdo con los siguientes supuestos: 1) toda la superficie de UGA C1 contribuye a la recarga, 2) toda el área de UGA C1 se considera conservada y por lo tanto no se contabilizan las perturbaciones, y 3) la capacidad máxima de humedad del suelo (STC) se distribuye uniformemente en UGA C1. La recarga estimada se considera como la recarga potencial del acuífero, definida como la parte de la precipitación que se infiltra por debajo de la zona de raíces (Pulido-Velazquez et al., 2018). La recarga estimada ocurre cuando la humedad del suelo está en el STC y la precipitación mensual (P_i) excede la evapotranspiración mensual (ET_{oi}), como se establece en la ecuación 12 (Alley, 1984; Rodríguez-Huerta et al., 2019a)

$$\Delta R = \begin{cases} (P_i - ET_{oi}) - (STC - S_{i-1}) & \text{para } P_i \geq ET_{oi} \text{ \& } S_i = STC \\ Else 0 & \end{cases} \quad (\text{Ecuación 12})$$

donde P_i representa la precipitación para cada mes, S_i la humedad del suelo disponible para cada mes, S_{i-1} es la cantidad de humedad del suelo del mes anterior y $STC = 224$ mm según lo estimado por Rodríguez-Huerta et al. (Rodríguez-Huerta et al., 2019a) para la isla de Cozumel. El STC se calcula multiplicando la capacidad de agua disponible del suelo y la profundidad de las raíces de la vegetación. Los cálculos del volumen de recarga comenzaron en septiembre de 1989 debido al elevado valor de precipitación, por lo que se considera $S_i = STC$ para ese mes. Por esto, los cálculos estimados de recarga para cada mes en 1989 no

fueron posibles y comenzaron a partir de 1990. Los volúmenes de recarga estimados mensualmente para UGA C1 se obtuvieron multiplicando los valores de recarga (ΔR) por el área de UGA C1 (68,85 km²).

Análisis de datos

Estimación de tendencias

Antes del análisis de tendencias de Mann-Kendall, uno de los requisitos es la ausencia de autocorrelación en los datos (Helsel & Hirsch, 2002; Modaresi et al., 2016), lo cual ocurre cuando las observaciones están fuertemente correlacionadas entre sí, entre un punto de datos y su punto adyacente (Helsel & Hirsch, 2002). Para identificar la presencia de autocorrelación, se probaron conjuntos de datos de indicadores individuales para el coeficiente de autocorrelación (r_1) mediante la ecuación 13 (Shewhart & Wilks, 2016):

$$r_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (X_i - \bar{x}) * (X_{i+1} - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^2} \quad (\text{Ecuación 13}) \quad (3)$$

Donde n es el número total de registros mensuales para cada variable, X_i representa un valor en la serie de datos, X_{i+1} representa el siguiente valor de X_i y \bar{x} es el promedio de la variable dada. Los intervalos de confianza del 95% se estimaron de acuerdo con la ecuación 14:

$$r_1(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96\sqrt{n-2}}{n-1} \quad (\text{Ecuación 14})$$

Si el valor de r_1 estimado caía entre los intervalos de r_1 (95%), entonces los datos se consideraron correlacionados en serie (Ahmad et al., 2015).

Prueba de Mann-Kendall

Esta prueba ha sido utilizada y recomendada por la Organización Meteorológica Mundial para evaluar tendencias en datos climáticos, hidrológicos y de recursos hídricos (Jaiswal et al., 2015). Las tendencias nos permiten visualizar si los datos aumentan, disminuyen o permanecen estáticos en el tiempo, pudiendo estimarse mediante la prueba no paramétrica de Mann-Kendall (MKt) (Chen et al., 2015; Emeribe et al., 2019; Hussain et al., 2015). MKt se

estima al comparar una diferencia negativa o positiva entre pares consecutivos de valores dentro del conjunto de datos, sin considerar la magnitud de la diferencia (Rosmann et al., 2016). En este estudio, se realizó MKt pues la prueba no requiere de una distribución normal de datos y los valores atípicos (como los eventos de precipitación extrema) no afectan el resultado (Ahmad et al., 2015; Jaiswal et al., 2015). En esta prueba, la ausencia de tendencia corresponde a la hipótesis nula y una tendencia positiva o negativa corresponde a la hipótesis alternativa. Para estimar los valores de S, VAR (S) y Z se utilizaron las ecuaciones 15 a 17 (Phuong et al., 2019; Rosmann et al., 2016):

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n sig(X_j - X_i) \quad (Ecuación 15)$$

$$sig(X_j - X_i) = \begin{cases} +1 & \text{if } X_j - X_i > 0 \\ 0 & \text{if } X_j - X_i = 0 \\ -1 & \text{if } X_j - X_i < 0 \end{cases}$$

VAR (S) se estimó de acuerdo con:

$$VAR(S) = \frac{1}{18} [n * (n - 1) * (2n + 5)] \quad (Ecuación 16)$$

Y el valor de Z con:

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{VAR(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{VAR(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (Ecuación 17)$$

Donde n es el número total de registros mensuales para cada variable, X_i representa un valor en la serie de datos y X_j representa el siguiente valor de X_i .

Se consideró un valor crítico de 1.96 para $Z_{1-\alpha/2}$ con un valor de α de 0.05 (Ahmad et al.,

2015). El valor estimado de Z corresponde a una tendencia significativa positiva o negativa siempre que el valor calculado de Z sea mayor o menor que el intervalo entre 1,96 y -1,96; de lo contrario, se asume que no existe una tendencia significativa (Ercan & Yüce, 2017; Yadav et al., 2014).

Pendiente de Sen

Para tomar en cuenta la magnitud de la diferencia de tendencias, se utilizó el método de estimación de pendientes de Sen (Rosmann et al., 2016). Este método empareja todos los valores de una serie de tiempo y estima su pendiente, luego usa la mediana de estas pendientes para calcular una pendiente general, como se describe en la ecuación 18 (Hussain et al., 2015):

$$T_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \text{ for } i=1,2,3,\dots,n \quad (\text{Ecuación 18})$$

donde x_j y x_k son valores de datos en los tiempos j y k ($j > k$), respectivamente. Las tendencias crecientes y decrecientes corresponden a signos positivos y negativos de las pendientes estimadas (Phuong et al., 2019).

Diagramas de caja

Los diagramas de caja son una representación visual útil y concisa de un conjunto de datos dentro de un rango inter cuartil, detectando e ilustrando cambios de ubicación y variación entre diferentes grupos de datos. En ellos, se proporcionan visualizaciones gráficas de la presencia o ausencia de: valores inusuales (valores atípicos), asimetría (tamaño relativo de las mitades de caja), variación en la dispersión (rango intercuartílico o altura de caja) y centro de datos (mediana o la línea central del cuadro) (Helsel & Hirsch, 2002). Para este trabajo, se utilizaron diagramas de caja para identificar las variaciones anuales de cada conjunto de datos de indicadores (Modaresi et al., 2016; Saadat et al., 2013; Toews et al., 2007), esto se logró al agrupar todos los datos de cada uno de los doce meses dentro del período de tiempo analizado y en cada serie de tiempo (ejemplo: todos los valores de precipitación para enero de 1989 a 2019). Esto permitió identificar la variabilidad del rango de los datos, las medianas

y distribución cuartil de los datos para cada indicador. La estacionalidad se pudo identificar visualmente por la posición de la línea en el centro de cada casilla (mediana para cada mes), media y mediana de las casillas anterior y siguiente. Los valores estacionales tienen un ciclo anual generalizado (Toews et al., 2007) y suelen mostrar un patrón anual con valores de un comportamiento similar que permite la formación de grupos (Saadat et al., 2013).

Análisis de series de tiempo

Las series de tiempo son observaciones secuenciales a lo largo del tiempo y un método valioso para identificar visualmente las tendencias y el comportamiento general de los datos (Neeti et al., 2012). Se elaboraron series de tiempo para precipitación mensual, temperatura media, evapotranspiración, volumen de recarga estimado, captación de agua y distribuciones sectoriales.

Software

Las series de tiempo, la prueba de pendiente de Sen y los diagramas de caja fueron elaborados y estimados por el software MINITAB vs. 18.

1.8.3 Integración (Capítulo 5)

Para la integración de la información abordada dentro del trabajo se optó por el desarrollo de un índice compuesto, los cuales se generan al integrar un amplio número de indicadores y que son utilizados en trabajos de sostenibilidad (PRI, 2007; Pulido & Sánchez, 2009). Por ello, el Índice Integrativo para el Manejo Sostenible de Acuíferos Insulares (IIMSAI) pretende evaluar el estado de las prácticas y recursos relacionados con el manejo del acuífero, tomando como base los elementos del MIRH, la TGS y SSE. Para elaborarlo, se utilizaron los métodos descritos por Juwana y colaboradores (2012), siguiendo los pasos de: selección de indicadores, valores de subíndices, asignación de peso y agregación; considerando los resultados del trabajo de tesis e indicadores de otros índices relacionados con el manejo y sostenibilidad de acuíferos (Cervera, 2007; OECD, 2008; Pandey et al., 2011; Shrestha et al., 2016; Singh et al., 2012; Van Beynen et al., 2018).

Indicadores

Para elegir a los indicadores se tomaron en cuenta que fueran: sensibles al paso del tiempo, predictivos, anticipatorios, imparciales, integrativos y apropiados para la transformación de información (Juwana et al., 2012). Se consideró como estructura principal a los tres dominios del desarrollo sostenible: ambiental, económico y social. La base para los indicadores fueron los elementos abordados en el presente trabajo: resultados de la revisión bibliográfica, modelo inicial de aspectos relacionados con el recurso hídrico, ICA, indicadores de servicios de distribución, dinámicas de recarga, extracción y consumo del recurso, así como el ISAC.

Valores de subíndices

Debido a la amplia variedad de indicadores abordados, dentro de este índice se consideran los siguientes métodos de puntuación: escala continua, diferencias anuales, escala categórica y distancia a una referencia.

En el índice se manejan medidas cualitativas y cuantitativas, sin embargo, fue necesario homogenizar el sistema de calificación. Es por ello que en todos los indicadores se eligió la clasificación con la cual se abarcó un rango del 0 a 1, repartido de manera equitativa entre las opciones (Pandey et al., 2011). Las clasificaciones utilizadas para determinar la puntuación (x_i) de acuerdo con los casos particulares para cada indicador se describen dentro de la Tabla 15.

Peso

A cada indicador se les asignó pesos (w_i) similares bajo el esquema de peso equitativo, con lo cual no se favorece a ningún indicador (Juwana et al., 2012). El asignar pesos iguales es una manera de evitar sesgos en los resultados por diferencias en los pesos, con lo que se les asigna la misma importancia a cada indicador (Pandey et al., 2011). Ésta manera de asignar pesos ha sido utilizada en otros indicadores como: huella ecológica, índice de desarrollo humano y el índice de vulnerabilidad ambiental (Böhringer & Jochem, 2007).

Agregación

Para estimar la puntuación final se utilizó el método aritmético de agregación y que consiste en la suma de todos los valores de los componentes (Juwana et al., 2012). La puntuación final para el índice se obtuvo al multiplicar el valor del indicador (x_i) por el peso atribuido (w_i) y finalmente realizar la sumatoria total, de acuerdo con la ecuación 19:

$$I = \sum_{i=1}^N x_i w_i \quad (\text{Ecuación 19})$$

Al final el valor estimado se comparó dentro de la siguiente escala: de 0 a 0.19 = altamente insostenible, de 0.2 a 0.39 = moderadamente insostenible, de 0.4 a 0.59 = insostenible, de 0.6 a 0.79 = ligeramente insostenible y de 0.8 a 1 = con bases para la sostenibilidad.

1.8.4 Propuesta de modelo de manejo sostenible

Para elaborar el modelo sostenible del acuífero se consideraron la mayoría de los resultados del análisis, categorización de la información, la adecuación de indicadores a las características locales y su determinación. La mayor parte de estos elementos abordados en la tesis ya son considerados por el IIMSAI, aunque no fue posible integrar a todos dentro del índice, como sucedió con la información de: mapas, volumen consumido por usuarios, costos del recurso y estado de las prácticas hacia la sostenibilidad. El modelo sostenible del acuífero de Cozumel se fundamenta en la TGS y SSE (AMA, 2000; McGinnis & Ostrom, 2012; Ostrom, 2007, 2009; Van Der Zaag & Savenije, 2014b), además de considerar una escala temporal (Gumbo & Zaag, 2012). En la TGS se plantea que el todo dentro del acuífero es más que la suma individual de sus partes; considerando la complejidad de los elementos de un acuífero de manera integrativa. En estudios de SSE las variables relevantes de acuerdo con Ostrom (2009) son: recursos en el sistema, unidades del recurso, sistemas de gobernanza y usuarios; abordados dentro de la tesis y en el modelo final al considerar: las áreas designadas para la recarga del acuífero como la UGA C1, la dinámica de recarga y extracción, el marco jurídico e institucional en torno al recurso y el consumo del recurso por diferentes sectores y usuarios. Con la escala temporal se incentivan a las re evaluaciones del modelo en el futuro, en las cuales se deberá adecuar la información para que refleje las condiciones actuales. Con esto, se pretende que la incertidumbre y elementos no contemplados sean

evaluados para realizar adecuaciones en alguno de los elementos considerados dentro del modelo, asegurando su vigencia a través del tiempo.

La propuesta para el manejo integral abordó a los siguientes elementos:

- 1) Describir el estado actual del acuífero dentro de la UGA C1 desde la calidad y cantidad, considerando reajustes al volumen calculado de recarga.
- 2) Describir el consumo actual de agua por parte de los diferentes sectores de manera directa e indirecta en la isla de Cozumel.
- 3) El desarrollo de un modelo descriptivo sobre los elementos que deban ser considerados para la gestión sostenible en la isla de Cozumel.
- 4) Análisis de los índices e indicadores modificados a las condiciones de la Isla.
- 5) Propuestas metodológicas para la integración de información (específica para Cozumel) para el desarrollo de un modelo de gestión sostenible del acuífero.
- 6) Modelo de gestión sostenible del acuífero.
 - a. Propuesta para el uso eficiente del recurso hídrico en Cozumel.
 - b. Plan de monitoreo de la calidad del acuífero en UGA C1, Cozumel (puntos de muestreo, periodicidad y parámetros).
 - c. Identificación y estrategias para la mitigación de elementos con incidencia negativa sobre el acuífero.
 - d. Estrategias para reducir la falta de información sobre temas relacionados a la gestión sostenible en Cozumel

Se describieron a los elementos a-d del apartado 6 utilizando el modelo sostenible para el acuífero de Cozumel (MSAC) descrito en el Capítulo 5 (apartado 5.3.3), como parte de la propuesta para el manejo integral. En el caso del presente trabajo, sólo se abordaron a las estrategias para los objetivos en el corto plazo.

De acuerdo con los métodos propuestos en el MSAC, es necesario seguir cuatro estrategias:

- 1) Evaluar la información disponible y los elementos con los que se relaciona el acuífero mediante los instrumentos y métodos propuestos: revisión bibliográfica, entrevistas, mapas, índices y dinámicas; permitiendo identificar problemáticas y su descripción en algún aspecto del acuífero.

- 2) Crear objetivos para el corto, mediano y largo plazo.
- 3) Para cada objetivo y en cada escala se definen estrategias en: políticas, instituciones, métodos de financiamiento, integración de usuarios dentro del manejo y divulgación (PIFID). Las políticas se refieren a las leyes y normas que deben ser contempladas. Instituciones se refiere a grupos establecidos de carácter público o privado. El financiamiento involucra a las fuentes para cubrir los costos contemplados dentro del proyecto, pueden ser recursos monetarios, bienes o servicios. La integración se refiere a el involucramiento de diferentes sectores de usuarios del recurso; mientras que la divulgación son los mecanismos para la transmisión de los resultados y avances de cada objetivo.
- 4) Establecer monitoreos, una evaluación general, el avance de los objetivos, las estrategias y los instrumentos planteados en los puntos anteriores.

El modelo no es estático y sus elementos deben ser constantemente evaluados. Este proceso se deberá repetir periódicamente y cada vez que se identifiquen posibles nuevos elementos o elementos no contemplados que requieran evaluación; pues la constante actualización es lo que permite que el modelo refleje las condiciones reales del acuífero, los elementos con los que se relaciona, la vigencia de los objetivos propuestos y la factibilidad de las estrategias.

1.9 Área de estudio

Cozumel es la tercera Isla más grande de México, se localiza en el estado de Quintana Roo y se ubica a 17.5 Km de la costa de la ciudad de Playa del Carmen (Hernández-Flores et al., 2020; Zack & Lara, 2003). La Isla mide en promedio 39 km de largo por 12.8 (Dirección General Adjunta de Oceanografía Hidrografía y Meteorología, n.d.) con una superficie de 473 Km² (CONAGUA, 2015a).

El acuífero se encuentra dentro de la Región Hidrológica XII, con la clave RH32, que abarca la Península de Yucatán (CONAGUA, 2015a; INEGI, 2017). En específico, la CONAGUA tiene asignado al acuífero en Cozumel con la clave 2305 (CONAGUA, 2018b). En este acuífero, como en otros igualmente costeros, existe una interfase estática entre el agua dulce y el agua salada que se mantiene a través del movimiento de agua dulce hacia el mar. Esto se describe por la fórmula Ghyben-Herzberg, en donde se relaciona la profundidad de la

interfase debajo del nivel del mar (h_s) con la altura del agua subterránea por encima del nivel del mar (h_f) como se observa en la Figura 4 (Todorovic & Verruijt, 1968), considerando al movimiento horizontal a través de ojos de agua que desembocan al mar (Deng et al., 2017). Por ello, un modelo en extremo simplificado para el acuífero de Cozumel se representa como una lente de agua dulce que flota sobre una interfase salina. Sin embargo, los estudios de caracterización generan información sobre diversas variables con las cuales se incrementa el grado de complejidad del modelo de agua dulce, por lo que se espera una alta heterogeneidad a lo largo del acuífero.

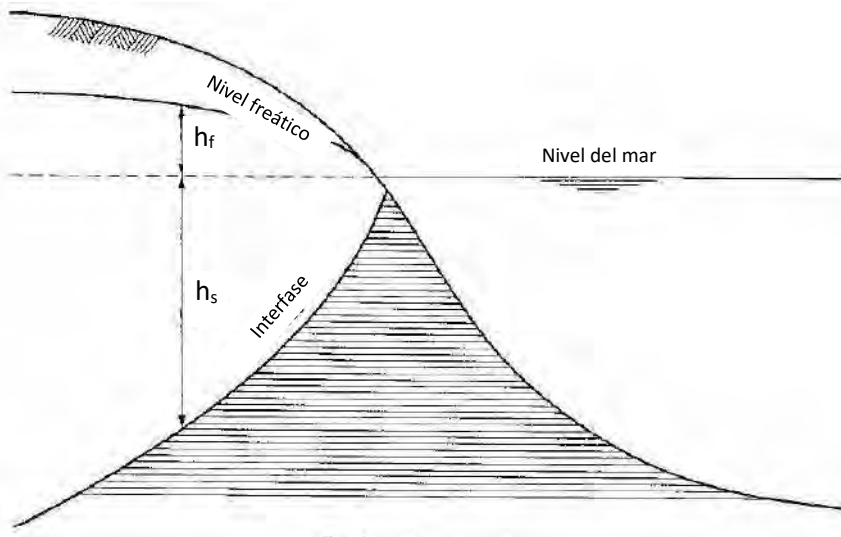


Figura 4. Modelo de acuíferos costeros. Modificado de Todorovic & Verruijt, 1968.

Suelo

En Cozumel se presenta un relieve sensiblemente plano en la mayoría de su territorio, alternando áreas planas con lomas de poca altura (INEGI, 2002). La edafología insular es descrita ampliamente en la agenda de Competitividad Turística (SECTUR, 2013). En el documento se describen los suelos como:

“Los suelos presentes en el área son de naturaleza rocosa y orgánica de formación reciente, con una textura arenosa – arcillosa, con coloración de blanco a gris; se encuentran en relieves

planos o sobre lomas de pendiente muy suave; clasificados por la FAO-UNESCO como Litosoles, los cuales presentan una profundidad máxima de 10cm y Rendzinas con profundidades ligeramente mayores a los 15 cm. Son los denominados Tzequel y Boshluum en la clasificación maya; caracterizados por un drenaje eficiente, en los que la roca aflorante forma extensas capas de laja” (p. 21).

Clima y precipitación

El clima en Cozumel es cálido húmedo con una temperatura media anual que fluctúa entre 22 a 26°C (Ayuntamiento del Municipio de Cozumel, 2011c, 2011b). De acuerdo con la información recabada de los años 1961 a 2005 (Orellana et al., 2007), la precipitación es de 1400-1500 mm en la mayor parte de la Isla, con excepción del extremo noreste que presenta un valor de 1300-1400 mm (Figura 5). Los máximos de precipitación se reportan en Junio-Septiembre-Octubre y los meses críticos de sequía entre marzo – abril (SECTUR, 2013), como se muestra en la Figura 6.

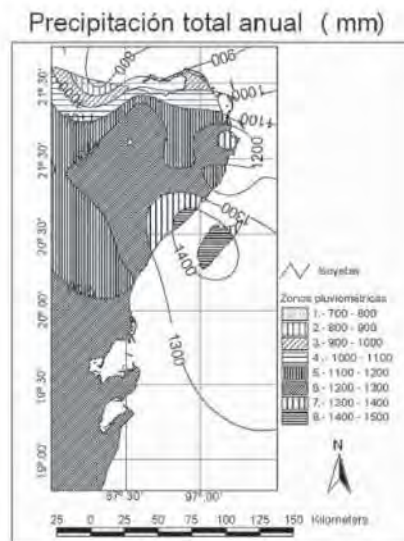


Figura 5 Distribución de la precipitación en el estado de Quintana Roo, en Cozumel se identifica menor precipitación en el extremo Noreste. Tomado de Orellana et al., 2007

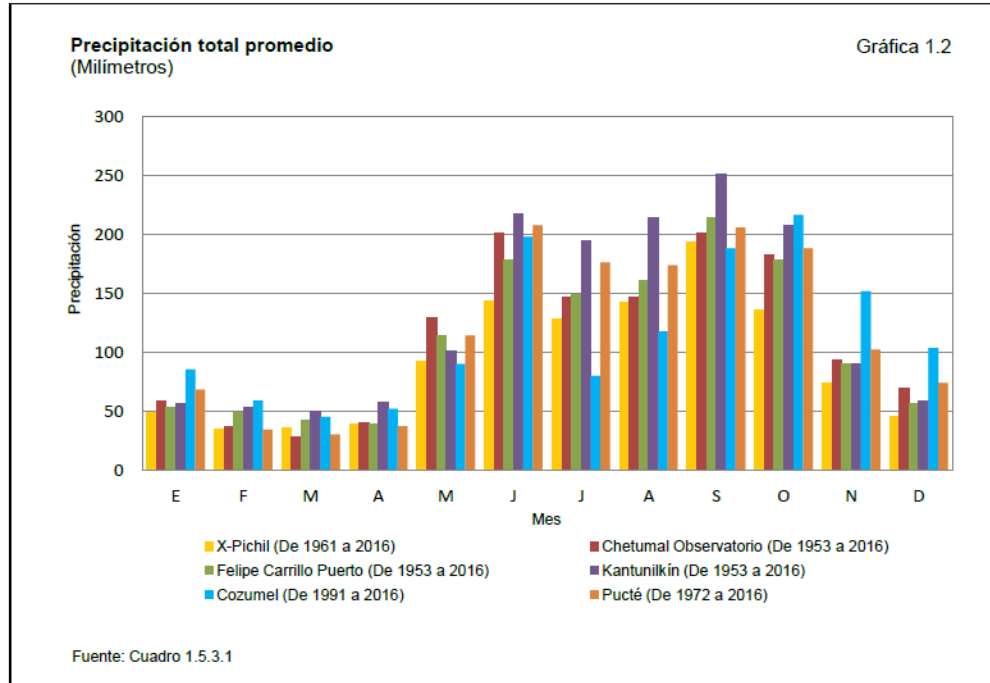


Figura 6. Precipitación total promedio en mm por mes para municipios de Quintana Roo, incluyendo Cozumel (azul claro) de 1991-2016. Tomado de INEGI, 2017.

Es importante mencionar que Cozumel se encuentra dentro de la zona que es vulnerable al impacto de huracanes. La temporada de ciclones tropicales inicia oficialmente el 1 de junio y termina el 30 de Noviembre (Ihl & Frausto, 2014). Entre estos meses en promedio surgen 9 ciclones tropicales en el Golfo de México y Mar Caribe, de los cuales 4 inciden sobre el territorio (Palafox & Gutiérrez, 2013). Dos de los más significativos han sido “Wilma” y “Emily”, con fuertes vientos (215 km/h) y ráfagas (de hasta 260km/h). Estos fenómenos son importantes porque son capaces de alterar la configuración del territorio e incidir sobre el ecosistema de la Isla. Por ejemplo, en Cozumel se reportó que estos huracanes causaron una alta mortandad en especies bentónicas, así como la movilización de grandes volúmenes de arena, lo cual favoreció a la exposición de la roca que se encontraba por debajo de la arena (Álvarez del Castillo-Cárdenas et al., 2008). Se desconoce con certeza a el efecto de estos fenómenos sobre el acuífero en Cozumel, sin embargo, se han reconocido riesgos de contaminación de agua subterránea por el paso de huracanes en el estado de Yucatán (Pacheco et al., 2004).

Vegetación

La vegetación (Figura 7) presente en la Isla abarca: selva perennifolia, selva baja, media y alta subperinifolia, selva baja y mediana subcaducifolia, manglares, vegetación de dunas costeras, palmar y popal-tular (Ayuntamiento del Municipio de Cozumel, 2011c; Escalante, 1996; SEMARNAT, 2016). De las 542 familias de flora en la Isla, el 57% de las especies en el territorio lo representan sólo 15 de ellas (Ayuntamiento del Municipio de Cozumel, 2006a).

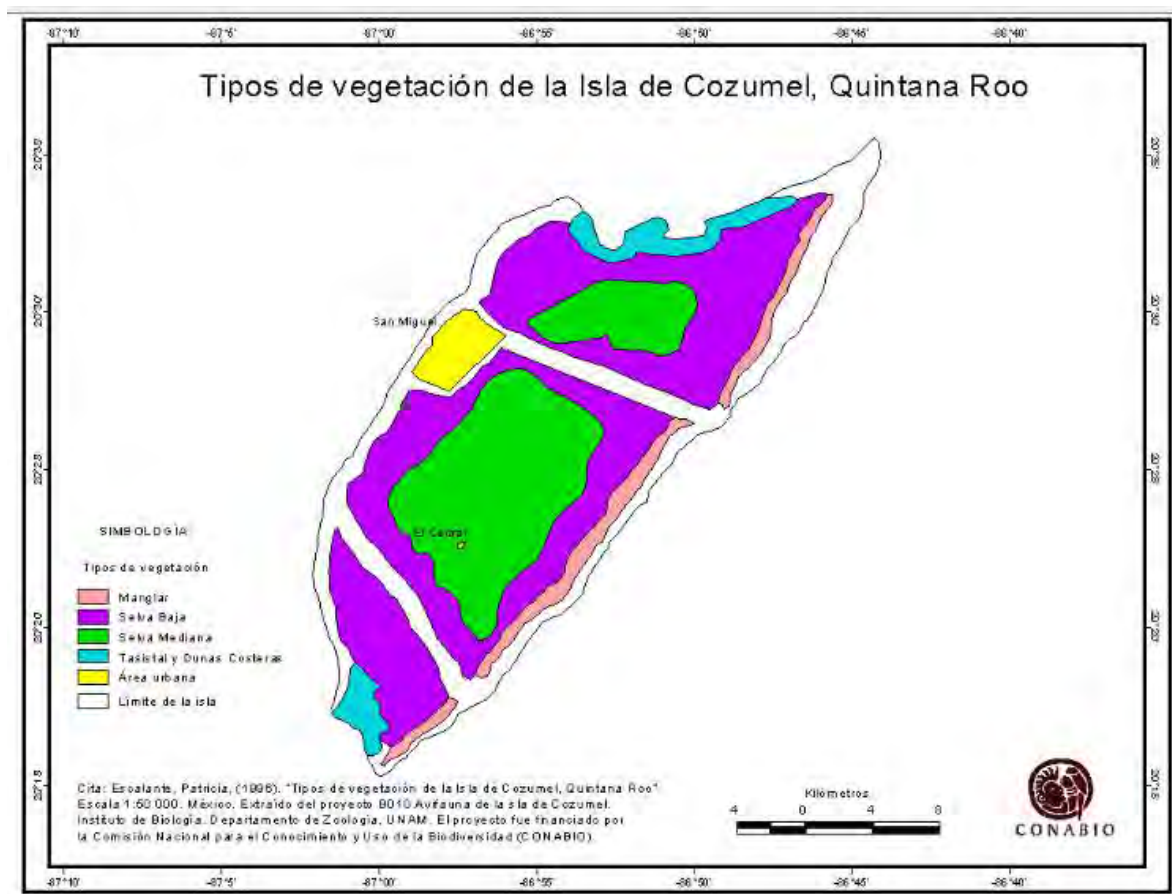


Figura 7. Tipos de vegetación en Cozumel. Tomado de Escalante, 1996

Cenotes

Los cenotes se forman por la disolución del carst, dando lugar a cavidades en las que por lo general se almacena agua dulce. Estas formaciones se relacionan con el acuífero, pues son sitios en los cuales el agua subterránea tiene acceso a la superficie. De acuerdo con información de la Subdirección de Ecología en Cozumel, se tienen identificados 37 cenotes (Infomex, 2018d, 2018m) de los cuales se cuenta con georreferenciación y dimensiones para

31 de ellos (Anexo 4). En otro trabajo (Yáñez-Mendoza et al., 2007), se describen las características de 19 cenotes y su ubicación. Finalmente se cuenta con el reporte de 2,551 cenotes dentro del estudio hidrogeológico de la Isla, encontrando la mayor cantidad en la zona cercana al Cedral, la antigua terraza de la Isla y en zonas de filtración (Frausto et al., 2018).

Biota asociada con el acuífero

Uno de los elementos claves dentro de la caracterización de los acuíferos, es la descripción de la fauna que ahí se encuentra (Steube et al., 2009). Se han hecho descripciones sobre las especies que habitan en la porción dulceacuícola de Cozumel, dentro de ellas zooplancton (Arroyo-Castro et al., 2019; Cervantes-Martínez, Guitiérrez-Aguirre, Delgado-Blas, et al., 2018), especies de peces (Guitiérrez-Aguirre et al., 2018; Schmitter-Soto, 2007) y moluscos (Richards, 1937). Sin embargo, aún son necesarios trabajos de investigación que permitan la caracterización de las especies que habitan dentro del acuífero (incluyendo las comunidades microbianas), al igual que su distribución y dinámicas poblacionales. El monitoreo de la diversidad y distribución de especies dulceacuícolas, junto con la descripción de la calidad del agua, es una herramienta de apoyo para conocer el grado de conservación del acuífero, pues cambios en las estructuras poblacionales pueden ser indicadores de impactos sobre la calidad del agua.

1.10 Discusión y Conclusiones

En el Capítulo presente se planteó de manera general la situación relacionada con el acuífero en Cozumel y la necesidad de un trabajo que aborde el MIRH. Este tipo de trabajos son indispensables para ambientes con un limitado acceso al recurso hídrico, como lo son las islas en la región del Caribe. Dentro del Capítulo se plantean las bases teórico metodológicas para el desarrollo del trabajo de investigación, la hipótesis y los objetivos. Se presentaron, los antecedentes, el planteamiento del problema, la pregunta de investigación y las justificantes del proyecto. Después se describieron y justificaron los métodos utilizados para el desarrollo del proyecto.

Los resultados de cada uno de los elementos se abordarán con mayor profundidad dentro de los Capítulos 2 al 5; mientras que los Capítulos 6 y 7 corresponden con la discusión y las conclusiones generales del trabajo.

Capítulo 2 - Manejo integral sostenible de acuíferos costeros e insulares*

2.1 Introducción

El agua es uno de los recursos más importantes para el desarrollo de la vida y de las actividades socioeconómicas en el mundo, sobre todo en zonas costeras e insulares, donde se concentra más del 50% de la población mundial (Durán-Sánchez et al., 2018). Desafortunadamente la disponibilidad del recurso se ve amenazada por los efectos del cambio climático, las actividades socioeconómicas y el incremento poblacional. Por ello, es necesario desarrollar estrategias sostenibles para el MIRH en los acuíferos costeros e insulares. Actualmente existen diferentes definiciones sobre el MIRH, siendo la más aceptada la descrita por la AMA:

“El MIRH es un proceso que promueve el manejo y desarrollo coordinado del agua, la tierra y los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico resultante de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales” (AMA, 2000, p. 24)

2.2 Objetivo

Como parte del análisis de la información disponible a través de investigación bibliográfica sobre los aspectos sociales, económicos y ambientales en Cozumel; dentro del presente Capítulo se analizó el concepto de MIRH en acuíferos costeros e insulares desde la postura definida por la AMA, su relación con la sostenibilidad, su implementación y finalmente un análisis del concepto aplicado para la situación actual de la Isla.

2.3 Desarrollo y análisis

El concepto de MIRH se consolidó a partir de la conferencia de Mar de Plata en 1977 y en la Reunión Mundial para el Desarrollo Sostenible en 1992, pues previamente se manejaban los conceptos de “desarrollo de recursos hídricos y “manejo de recursos hídricos” (Grigg, 2008; Hassing et al., 2009; ONU, 2014). El objetivo del concepto definido por AMA de MIRH es

*Información de este capítulo se complementa con los artículos de los anexos 6 y 7.

el de lograr un balance entre: la eficiencia económica, la equidad social y la sostenibilidad de los ambientes, tomando como base a los 4 principios de Dublín (AMA, 2000; Hassing et al., 2009; Martínez-Santos et al., 2014). Por lo tanto, para el manejo del recurso hídrico se consideran 4 dimensiones: los usuarios, el recurso, la dimensión espacial y la dimensión temporal (AMA, 2000; Van Der Zaag & Savenije, 2014b).

De acuerdo con la definición de estado del arte propuesta por Montoya en 2005, en un área de conocimiento no es sólo necesario inventariar y sistematizar, sino de también hacer una reflexión sobre tendencias y vacíos en el área. Con relación al MIRH, durante la década de los 80s y 90s se enfocó en estrategias para maximizar el uso de agua para consumo, apoyándose de estrategias como: mejorar la eficiencia del suministro, reduciendo las fugas, el reúso del agua, cambios de precios, estructuras de licencias, mejoras tecnológicas y campañas de educación en todos los sectores de usuarios (Jeffrey & Gearey, 2006). En años consecutivos, tras haber formalizado el concepto, el MIRH se comenzó a separar en dos grandes corrientes: teórico y práctico (implementación). En la parte teórica han habido aportes importantes por autores como Van der Zaag y Savenije, así como de instituciones como la AMA y UNESCO (Kennedy et al., 2009). Por otra parte, los aportes prácticos son más difíciles de encontrar dentro de la literatura. Esto se debe a que la implementación y el seguimiento de las estrategias en el mediano o largo plazo es complicada financieramente, sumado que no existe una solución universal para abordar los retos del MIRH. Además los escenarios de implementación (ciudades, estados, regiones, países, etc.) son dinámicos con poblaciones creciendo y cambiando a través del tiempo, en ocasiones presentando modificaciones en los patrones de variables hidrometeorológicas en la región y cambios en la estructura socioeconómica, con lo que se dificulta el seguimiento e implementación de estrategias. Por ejemplo, después de la conferencia Río +20, de 80% de 134 países encuestados indicaron que desde 1992 se habían propuesto favorecer las condiciones para el MIRH, aunque sólo 50% admitieron avances significativos hacia el desarrollo e implementación de planes para el MIRH (Cashman, 2017). Todo esto resulta en que una estrategia quizás no sea adecuada años después de su implementación debido a algún cambio en la localidad. En general, dentro del MIRH la tendencia parece ir encaminada hacia la adopción de estrategias con base en las características locales. Por ello se han incrementado las regionalizaciones de instituciones como la AMA, creando sedes para el Caribe; además

de la creación de instituciones relacionadas con el agua como la CWWA, dentro de la misma región. Estas regionalizaciones permitirán utilizar un abanico de opciones metodológicas para favorecer estrategias de sostenibilidad, considerando las características de la localidad, contribuyendo con información para cubrir vacíos dentro del área de implementación del MIRH.

El MIRH coincide con el desarrollo sostenible al enfatizar el potencial de los recursos y su manejo, en vez de sólo realizar acciones correctivas enfocadas en minimizar los efectos adversos de las actividades socioeconómicas sobre el medio ambiente (Koudstaal et al., 1992). Considero que existen 2 niveles de sostenibilidad dentro del concepto de MIRH. El primero se relaciona con la sostenibilidad del ecosistema y se fundamenta en la información disponible del entorno en un momento determinado. En el segundo nivel, se evalúa la eficiencia y permanencia del conjunto de estrategias planteadas (proyectos e iniciativas) para el MIRH en el largo plazo (GWPC, 2015), que aplicado a acuíferos costeros e insulares se puede denominar como: Manejo Integral Sostenible de Acuíferos Costeros e insulares (MISACI); considerando al acuífero como la unidad hidrológica práctica (AMA, 2009). Debido a que en este nivel la sostenibilidad corresponde con los impactos positivos y la continuidad de las estrategias en el largo plazo, su evaluación requiere de monitoreos en los años posteriores a su implementación (Loucks & Van Beek, 2017).

El MISACI se sustenta en diferentes teorías, por ejemplo el concepto se apoya de la teoría general de sistemas, pues con ella se plantea que el todo dentro del acuífero es más que la suma individual de sus partes; considerando a la complejidad de los elementos de un acuífero de manera integrativa (AMA, 2000). Complementariamente, dentro de la teoría de sistemas socio ecológicos se plantea la interacción del ser humano y las actividades económicas con el recurso hídrico, con lo cual se pueden identificar los beneficios en la sociedad provenientes de los acuíferos (Liehr et al., 2017). De igual manera, el concepto es paralelo con el Manejo Integral de Zonas Costeras (MIZC) en que ambos consideran a los recursos, políticas públicas, economía y sociedad de manera integrativa para el uso racional de los recursos en ambientes costeros (Rivera et al., 2004). Finalmente, con el manejo adaptativo se reajustan las estrategias actuales de MISACI, con base en información reciente, para abordar a las situaciones no previstas (problemas emergentes) o actualizar estrategias (Biswas, 2008a; Loucks & Van Beek, 2017).

Pese a los aspectos positivos del concepto, este ha sido criticado por algunos autores (Giordano & Shah, 2014; Martínez-Santos et al., 2014; Molle, 2008; Van Der Zaag & Savenije, 2014a). Considero que en países en vías de desarrollo la atención y recursos destinados al MISACI (instituciones, políticas y el manejo del recurso hídrico) son encaminados a procurar el bienestar social y económico mediante el desarrollo de medidas para brindar acceso al agua potable, saneamiento e higiene (por su acrónimo en inglés, WaSH) a las poblaciones, dificultando el desarrollo de las estrategias en otros sectores (económico) o escalas (meso y macro) (Biswas, 2008b). Giordano & Shah (2014) ejemplifican que en China, Asia Central y en el Este de la India, es posible desarrollar estrategias que contribuyan con el MIRH y que no necesariamente estén alineadas con los principios teóricos del mismo.

A lo largo de los años, se introdujeron términos relacionados y aunque algunos estaban simplemente de moda, otros se han conservado. Si bien la integralidad es una parte del concepto, la palabra “integral” se usa a menudo para comunicar la necesidad de considerar la complejidad de las políticas (Grigg, 2008). De acuerdo con la AMA (2000), la integración surge cuando se trata con una situación de “interacción regular de grupos de asuntos interdependientes que forman un todo uniforme”, considerando: al sistema natural y al sistema humano. El concepto de integración busca el manejo del recurso de una manera holística y comprensiva tomando en cuenta las cuatro dimensiones propuestas por Savenije y Van Der Zaag en 2008. Entonces, la integralidad dentro del manejo del recurso favorece el considerar las contribuciones y perspectivas de: usuarios planeadores, ciencias y gestores de políticas (Jeffrey & Gearey, 2006). Sin embargo la integralidad no ha sido bien vista por todos los autores, pues de acuerdo con Biswas (2008; 2008b) existe un problema con el lograr un entendimiento general sobre el concepto de MIRH, en parte porque existen al menos 42 conjuntos diferentes de temas recomendados para el concepto de integración en MIRH; lo cual puede incidir negativamente al crear confusión para la delimitación del concepto. Además, algunos autores ignoran la brecha entre teoría y práctica, con lo cual se ha imposibilitado la correcta implementación del MIRH (Santos, 2019). Es preciso mencionar que dada la “reciente” creación del concepto de MIRH, aún se encuentra en proceso de consolidación, por lo que trabajos como el presente aportan evidencia teórica y de estudio de caso con lo cual se contribuye al fortalecimiento del MIRH.

No existe una solución universal para los desafíos de los acuíferos costeros e insulares, pues al final es una sinergia entre políticas, actores, el recurso y el desarrollo económico (Kadi, 2014). Sin embargo para la implementación, la AMA (2000) recomienda comenzar creando un “ambiente propicio” a nivel nacional a través de: 1) Políticas locales y provinciales, 2) Desarrollo institucional e 3) Instrumentos de manejo. A continuación, se revisará cada una. La creación de un marco legal y de financiamiento, apoyado del desarrollo de políticas, contribuyen significativamente con el éxito o el fracaso, la continuidad y la eficiencia en el largo plazo del MIRH; pues establecen los lineamientos para quienes se relacionan con el recurso (Grigg, 2008; Snellen & Schrevel, 2004). Dentro del desarrollo de políticas y el mismo MIRH, se deben considerar a 3 componentes importantes: equidad, integridad ecológica y eficiencia del uso (Van Der Zaag & Savenije, 2014a). Algunos ejemplos de políticas son las de México en donde existen la Ley Nacional de Aguas (LAN) y la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), que están alineadas con disposiciones internacionales en temas como el agua y el desarrollo sostenible (Córdova, 2014). En Europa, la Unión Europea formó la directiva marco del agua (WFD) incorporando varios principios del MIRH dentro de un marco de política común sobre el agua para que cada país miembro reformule sus estrategias (DGE, 2015; Martínez-Santos, 2014). Desafortunadamente la aprobación de iniciativas nacionales no ha sido sencilla de lograr en todos los países; como sucedió en 2008 en el país insular Barbados, en donde no fue posible lograr que el ministro responsable aceptara una guía para el MIRH. También existe el caso del 2015 en La República Cooperativa de Guyana , donde un cambio de gobierno retrasó los esfuerzos para el MIRH (Cashman, 2017). Por último es importante considerar a los financiamientos nacionales o internacionales para el desarrollo de proyectos de MIRH brindados por instituciones como “The World Bank” u Organizaciones no gubernamentales como “World Wide Fund For Nature” (Molle, 2008; Schrevel, 1997).

El desarrollo institucional incluye a las organizaciones constituidas formalmente, redes de comunidad local, ideas e información dentro del cual pueden operar tomadores y manejadores del recurso (AMA, 2000). En México a partir de 1989, el organismo administrativo, consultivo, normativo y técnico del agua es la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), anteriormente conocida como la Secretaría de Recursos Hidráulicos (CONAGUA, 2018b; Tortajada & Contreras-Moreno, 2005). El papel de instituciones como

CONAGUA es asegurar que se aborde, desarrolle y maneje el recurso dentro del contexto de la planeación nacional (Falkland, 1992); aunque desafortunadamente se ha perdido credibilidad institucional en sus labores debido a una lista de 13 razones descritas por Córdova Bojorquez en 2014.

Por otra parte, Jamaica en 1990 (apoyado del Banco Interamericano del Desarrollo) se convirtió en un ejemplo de MISACI en su región al establecer su marco institucional actual creando el Ministerio de Agua, tierra, medio ambiente y cambio climático; lo cual impulsó en 2010 a la Comunidad del Caribe (CARICOM) a acordar términos de referencia para un consorcio de instituciones relacionadas con el agua, con el fin de desarrollar un marco común para el caribe (Cashman, 2017).

Finalmente, los instrumentos de manejo son una serie de métodos y herramientas (cuantitativos y cualitativos) para realizar elecciones racionales e informadas sobre la implementación del MIRH, como: disponibilidad y demanda del recurso, sistemas de información y comunicación, instrumentos regulatorios y económicos, entre otros (AMA, 2000). Además, AMA cuenta con una “caja de herramientas” que consta de 60 instrumentos relacionados con el MIRH, así como un depositario para consultar casos de estudio (AMA, 2017). En México, CONAGUA cuenta con instrumentos para el manejo del agua en donde se incluye a los Consejos de Cuenca como mecanismos de participación, mismos que en 2007 para atender los problemas específicos de las zonas geográficas dieron lugar a 89 Comités Técnicos de Aguas Subterráneas (COTAS) (CONAGUA, 2018b). Personalmente considero que en los instrumentos del MISACI se le debe dar prioridad a el WaSH, pues a nivel mundial en 2015 un aproximado de 663 millones de personas no contaron con acceso a fuentes mejoradas de agua y aproximadamente 2400 millones no contaron con acceso a saneamiento; repercutiendo directamente sobre el bienestar social, económico y ambiental (UNICEF Pacific, 2018). Además, en la implementación de estrategias del MISACI es necesaria la integración de la comunidad, para lo que primero deben ser cubiertas las necesidades básicas hídricas, de higiene y saneamiento en la población. Por otra parte, el costo del agua es una herramienta que se ha utilizado comúnmente para regular el consumo de agua por los usuarios, aunque su efectividad depende de factores como el tipo de tarifa y su valor (Molinos-Senante & Donoso, 2016); en el caso de Calvià (Mallorca) esta medida solo tuvo un efecto de reducción en el consumo el primer año de implementación (Deyà-Tortella et al.,

2017). De acuerdo con Zepeda y colaboradores en 2018, algunas de las estrategias más utilizadas en el MISACI son: modelaciones para caracterizar condiciones actuales y predecir comportamientos futuros, desalación de agua proveniente de acuíferos dañados y la recarga artificial de acuíferos.

De modo que la combinación de políticas, instituciones e Instrumentos (PIeIs) que pueden ser aplicadas dependerá del grado de avance hacia el MISACI en cada región. Por ejemplo, en Barbados e Islas Vírgenes Británicas se incentivó a través de subsidios o devolución de impuestos a la instalación y mantenimiento de sistemas para canalizar el agua de lluvia a cisternas que la reparten para actividades domésticas, con lo cual se reduce la presión sobre el acuífero (CEHI, 2006; GWPC, 2015); siendo estos sistemas una obligación por ley en Bermudas, islas vírgenes estadounidenses y Barbados. Dentro del desarrollo de este ensayo, observé que desafortunadamente en algunas regiones se favoreció al crecimiento económico y social, descuidando la sustentabilidad de los recursos; lo cual incentivó el desarrollo de problemas sobre la calidad y cantidad de agua en los acuíferos. Ejemplo de esto son los casos de la isla de Mallorca (España) (Essex et al., 2004), el acuífero costero en Hermosillo, Sonora (México) (Zepeda et al., 2018) y el país-isla de Chipre (Tzoraki et al., 2018). El MISACI es un proceso dinámico y adaptativo, por lo que es difícil catalogar de exitoso o fracaso al conjunto de PIels; sin embargo concuerdo con Cashman (2012) en reconocer que en los países del Caribe se cuentan con avances importantes hacia el MISACI a través del desarrollo de políticas hídricas, el reordenamiento del marco institucional y el apoyo de instituciones como la AMA y UNICEF.

En Cozumel, de acuerdo con el INEGI (INEGI, 2017) se cuenta con una buena cobertura de servicios de abastecimiento de agua entubada (97.23 %), buena calidad en el agua suministrada, buena cobertura de servicio alcantarillado (98.93%) y un buen volumen de agua residual tratada (100%). El agua que se bebe en la isla proviene de empresas privadas que extraen agua de mar, desalan y la comercializan. Por ello y de acuerdo con los indicadores establecidos en el WaSH posteriormente al 2015 (JMP et al., 2015), en Cozumel se ha avanzado significativamente en 3 de los 4 objetivos propuestos: reducir la defecación a cielo abierto, brindar agua potable, sanidad e higiene en las viviendas, escuelas y centros de salud. El desarrollo económico en la isla se debe principalmente al turismo, que no necesariamente refleja un bienestar social y económico equitativo; pues en el discurso de residentes de la Isla

se ha percibido una exclusión de los beneficios económicos y un decremento generalizado de la calidad de vida como lo afirman González, Macías, & Sepúlveda (2017).

En cuestiones ambientales, de acuerdo con resultados procedentes del trabajo que estoy desarrollando sobre el acuífero de Cozumel (datos no publicados) en la zona de captación administrada por la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado (CAPA) se ha observado un incremento en el número de pozos abatidos (de 31 a 55) y pozos en reposo (de 34 a 47) dentro del periodo 2013-2018, junto con un incremento del 16% en el volumen de extracción de agua de estos pozos del 2016 al 2018; además de haber identificado contaminantes emergentes y bacterias coliformes en pozos de asentamientos irregulares (Koch et al., 2017, 2016). Actualmente son necesarios estudios que permitan caracterizar la relación de las actividades socioeconómicas sobre el estado del acuífero en la Isla.

Con relación al marco de PIeIs, en el país las acciones sobre los acuíferos y manejo se rigen por el Programa Nacional Hídrico, los Programas Hídricos Regionales, la Ley de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Quintana Roo (LAPAEQR) y organismos como CAPA. En la Isla se cuentan con los principales instrumentos para la gestión y el manejo de zonas costeras como: 5 Áreas Naturales Protegidas (ANP), Ordenamiento Ecológico (Programa de Ordenamiento Ecológico Local <POEL> y Programa de Desarrollo Urbano<PDU>), Evaluaciones de Impacto Ambiental y una Zona Federal Marítimo Terrestre (ZOFEMAT) (Quiroga & Romero, 2019; Rivera et al., 2004). Es por esto que considero que el marco de PIeIs en Cozumel está más dirigido hacia la conservación a través de zonificación ambiental; pues el manejo del acuífero se realiza casi exclusivamente por CAPA, quien se enfoca al monitoreo, manejo de la red de distribución, del drenaje y de las aguas residuales (Tercera Legislatura Constitucional del Estado de Quintana Roo, 2017). Si bien, el marco político e institucional es una base indispensable para el MISACI y se debe reconocer su presencia en la Isla, en mi opinión no se cuenta actualmente con un esquema de planeación participativa local. Esto, pues los espacios o estrategias en las cuales se incluya la participación de la comunidad y/o usuarios en las decisiones con respecto al acuífero son escasas o nulas, lo cual decremента la gobernanza del recurso y la integralidad del manejo hídrico. Además, actualmente no hay financiamiento nacional o internacional, pues no existe un plan concreto para el MISACI el cuál financiar. De seguir así, probablemente los

problemas de disponibilidad y calidad de agua comienzan a ser frecuentes y tenderán a agudizarse con el paso del tiempo.

El MISACI no es un punto estático en el futuro al que se llegará, sino un constante proceso de actualización de estrategias ante las cambiantes condiciones ambientales, sociales y económicas que se relacionen con los acuíferos costeros e insulares. Idóneamente se deberían de aplicar desde una perspectiva preventiva, en conjunto con el desarrollo para promover su sostenibilidad. Desafortunadamente en la mayoría de los casos, las estrategias del MISACI tienden a ser de naturaleza correctiva, lo cual incrementa su complejidad y dificultan su implementación. Se coincide con la visión de los organismos internacionales (AMA, UNICEF, ONU) en la importancia del manejo responsable y sostenible del recurso hídrico; aunque también considero que se debe dar prioridad a las necesidades de agua potable, saneamiento e higiene de la población. El desarrollo socioeconómico de las comunidades en Islas y acuíferos costeros debería tomar como base de políticas, instituciones e instrumentos al recurso hídrico, un tipo de desarrollo hidrocentrista.

2.4 Conclusión

El concepto de sostenibilidad dentro de MISACI puede abordarse desde la definición de MIRH (sustentabilidad ambiental) y/o a través de la eficiencia y permanencia del conjunto de estrategias planteadas (PIeI, proyectos e iniciativas) en el largo plazo. Como parte del MISACI se definieron e identificaron a través de ejemplos: Políticas locales y provinciales, Desarrollo institucional e Instrumentos de manejo en acuíferos costeros e insulares. Finalmente, se reconoció en Cozumel un avance significativo en 3 de los 4 objetivos establecidos en el WaSH, una exclusión de los beneficios económicos del turismo en la población, así como evidencia de afectaciones sobre la disponibilidad y calidad de agua. Sin embargo, se reconoce la presencia de un marco político (LAN y LAPAEQR), institucional (CAPA) y de instrumentos para la gestión (ANP, POEL, PDU y ZOFEMAT).

Capítulo 3 – El acuífero en Cozumel: caracterización ambiental, económica y social. *

3.1 Introducción

Cozumel es una isla cárstica dentro del caribe mexicano. La conjunción de sus elementos ambientales, económicos y sociales tienen influencia sobre el estado de su acuífero. La caracterización del acuífero y sus elementos relacionados han avanzado con el pasar de los años y se ve reflejada en sus publicaciones. El desarrollo de nuevas tecnologías y métodos para describir a los elementos dentro de los tres ejes del desarrollo sostenible han permitido incrementar el detalle y la precisión de la información. Dentro de la Península de Yucatán, los muestreos sobre calidad del agua realizados por CONAGUA se complementan con muestreos por institutos de investigación, con lo que se han llegado a identificar: patrones de flujo subterráneo, variación en los parámetros fisicoquímicos y contaminantes (Bauer-Gottwein et al., 2011; Hernández-Terrones et al., 2015); aunque aún son necesarios estudios a una escala local y considerando las particularidades.

En cuestiones ambientales, el área del acuífero de Cozumel se consideraba como el 60% de la superficie de la Isla (SEMARNAT, 2007), porcentaje que se elevó al 100% en documentos posteriores (CONAGUA, 2015a). El mayor espesor de agua dulce en la Isla se encuentra dentro de la zona centro norte y que coincide con el área de pozos administrados por CAPA, mientras que la capa se adelgaza conforme se acerca a la línea de costa (Carrillo & Milán, 2012), con un espesor medio de entre 20 y 9 m. El nivel de agua en pozos en la Isla tiene un rango de 1 msnm sobre el nivel del mar (zona centro) hasta 0.1 msnm en locaciones cercanas a la costa (Zack & Lara, 2003). Dentro del eje ambiental, el uso de herramientas como los mapas para representar problemas y la estadística multivariada han probado ser útiles para la caracterización de cuerpos de agua (Cervantes-Martínez et al., 2015; Simeonov et al., 2010; Torres et al., 2014).

En cuestiones económicas relacionadas con el acuífero se ha reconocido la importancia del turismo como principal actividad económica. Actualmente no existen muchos trabajos sobre la demanda o el consumo de agua por este sector, pese a su importancia en la Isla (SECTUR,

*Información de este capítulo se complementa con los artículos de los anexos 6 y 7.

2018). Sin embargo, algunos organismos internacionales consideran el acceso al agua potable como una prioridad (JMP et al., 2015; WHO & UNICEF, 2017), pues en América Latina y el Caribe su acceso ha probado ser no equitativo (Bertoméu-sánchez & Serebrisky, 2018).

Dentro del eje social se ha reconocido la región este de la Península de Yucatán como el área con la mayor tasa de crecimiento de México (4.7% anual) (Hernández-Terrones et al., 2015). Existe evidencia de actividad humana en Cozumel hace 2,300 años antes del presente (Gompper et al., 2006). Con relación a su cultura, en tiempos prehispánicos Cozumel servía como un centro de peregrinaje para la diosa Ixchel, deidad de la luna, fertilidad, nacimiento y medicina (Patel, 2005); asociándola con los cenotes y al agua subterránea, pues era ahí la morada de la diosa lunar cuando desaparecía del cielo (Iwaniszewski, 2016). Parte del legado cultural se evidencia en sus sitios arqueológicos como: San Gervasio, santuario de la diosa maya Ixchel (Jamal et al., 2010). La percepción de la población con relación al recurso ha probado ser un elemento importante dentro del manejo del MIRH, siendo las entrevistas una herramienta práctica para su caracterización (Kang et al., 2017; Ramírez et al., 2016; Ribeiro & Zorn, 2021).

Dentro del siguiente Capítulo se abordan los elementos relacionados con el acuífero desde los tres ejes del desarrollo sostenible para lograr un diagnóstico sobre cada uno con base en los documentos consultados a través de una revisión bibliográfica, el análisis con estadística multivariada y entrevistas. Esto permite el caracterizar todos los elementos considerados dentro de un modelo inicial sobre los aspectos relacionados con el recurso hídrico.

3.2 Objetivos

- Analizar la información disponible a través de investigación bibliográfica e informantes clave sobre aspectos sociales, económicos y ambientales referentes al acuífero en UGA C1 en la isla de Cozumel.
- Categorizar con un modelo la información recopilada a través de investigación bibliográfica e informantes clave sobre el estado actual del acuífero en UGA C1, el entorno ambiental, el estado del recurso, las actividades socioeconómicas, los servicios de distribución, los usos y tradiciones, marco jurídico y demografía

relacionados con el agua, que deban ser considerados en un modelo de gestión sostenible en la isla de Cozumel.

3.3 Resultados

3.3.1 Ambiental

Estado de Pozos en UGA C1

Aunque el número de pozos dentro de la UGA C1 ha variado en diferentes documentos (Instituto Nacional de Ecología, 1998; Villegas, 2016; Wurl et al., 2003; Zack & Lara, 2003), el número oficial reportado por el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) hasta Junio de 2020 fue de 264. Actualmente, CAPA maneja una clasificación de 3 categorías para los pozos con base en la calidad del agua en la UGA C1 (Infomex, 2019f):

- “Activos operando”: Pozos operando sin problema de cantidad y calidad de extracción.
- “Activos en reposo”: Pozos temporalmente fuera de servicio por haber rebasado los límites máximos permitidos de la normatividad en cloruros.
- “Inactivos abatidos”: Pozos fuera de operación por presentar calidad de agua desfavorable para su extracción.

En los mapas se observa un incremento en la cantidad de pozos abatidos (de 31 a 55) y pozos en reposo (34 a 47) dentro del periodo 2013-2018 (Figura 8). Es notorio un incremento en el número de pozos abatidos dentro de la zona norte del eje 2 y centro-oeste del eje 3; de igual manera se identificó un incremento en la cantidad de pozos en reposo cercanos a la carretera transversal.

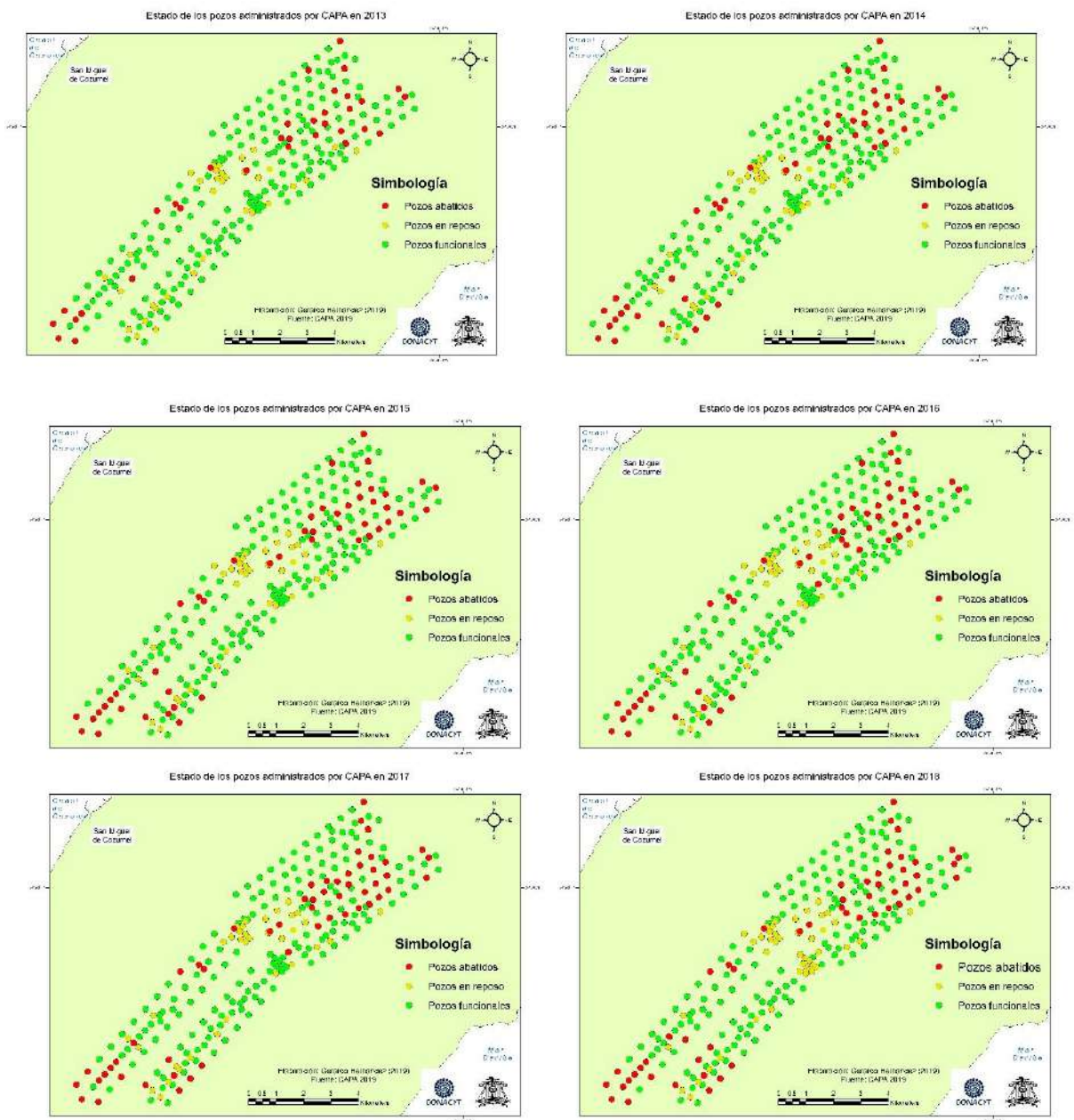


Figura 8. Estado anual de los pozos ubicados en UGA C1 para el periodo 2013 a 2018.

Grupos de agua

Base de datos

Con la información producto de la revisión bibliográfica se elaboró una base de datos (BD) con un total de 10,975 datos de 39 parámetros fisicoquímicos relacionados con calidad de agua y pertenecientes a 78 sitios de muestreo (Figura 9). Además, con información

únicamente de muestreos por CAPA se elaboró la BDCAPA con un total de 71,105 datos de 7 parámetros indicadores de calidad de agua pertenecientes a 90 sitios de muestreo (pozos). En la Tabla 3 se muestran los parámetros de calidad de agua, el número de veces reportado, su valor promedio, valor mínimo y valor máximo para la BD y BDCAPA. Se determinó que las variables reportadas con mayor frecuencia en BD fueron: temperatura, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto con valores mínimos y máximos de 21.2 - 37.2 °C, 104 - 56 371 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 0 - 23.6 mg/L respectivamente.

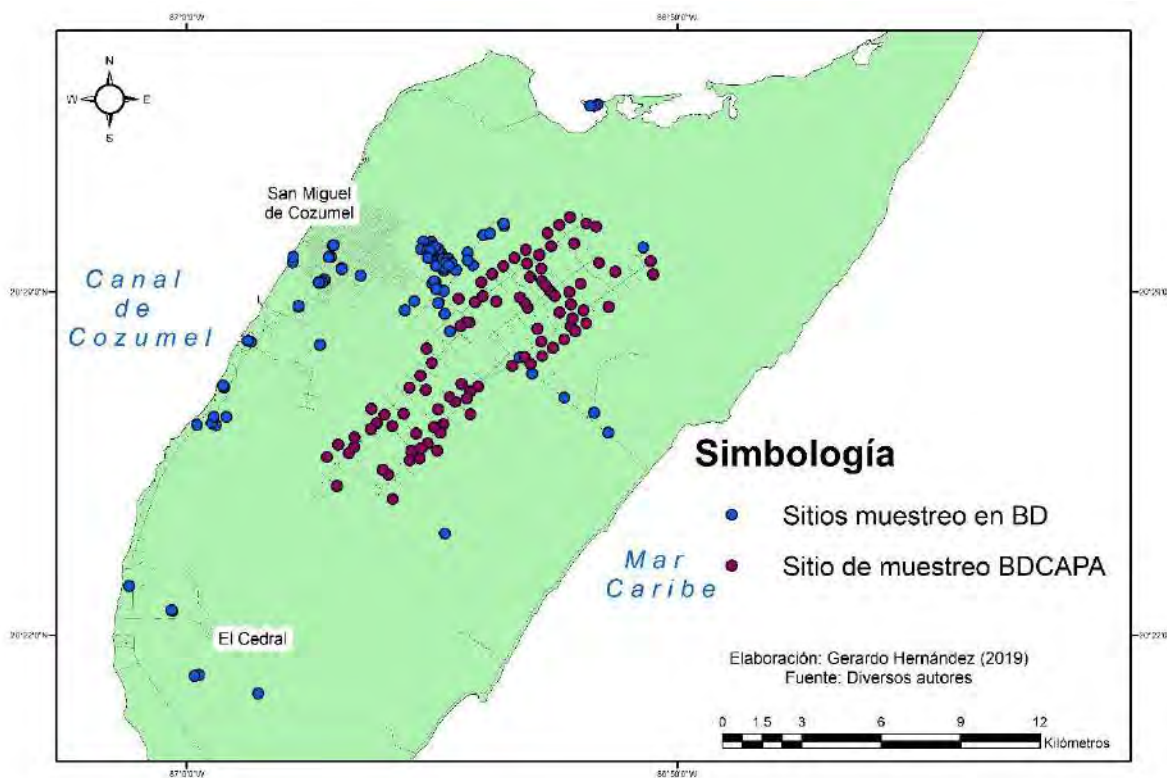


Figura 9. Sitios de muestreo que cuentan con información de calidad del agua del año 2002 al 2018 (BD) y 2005 al 2018 (BDCAPA).

Tabla 3. Resumen de los parámetros fisicoquímicos de la BD y BD CAPA.

Parámetro	Unidad	Número de Veces Reportada	Valor promedio	Valor Mínimo	Valor Máximo
Temperatura	°C	1205	25.7	21.2	37.2
CE	µS/cm	1176	15,463	104	56,371
OD	mg/L	1136	1	0	23.6
pH		1127	7.5	6.7	8.8
Salinidad	ppt	1126	10.3	0	37.5
PSO	%	1100	12.7	0	296
Profundidad	m	1036	7	0	40
Control fotoperiódico parcial en agua (PAR)	[µE/s/m ²]	509	13.2	0	1,089
Control fotoperiódico parcial en agua de referencia (refPAR)	[µE/s/m ²]	509	29.4	29	50
Secchi	m	352	2.3	0	27
Cl⁻	mg/L	268	717.8	4.9	7,272
N-NO₃⁻	mg/L	233	4.1	0	35
STD	mg/L	203	347.8	0.1	1,343
Mv		177	72.71	4.9	252
Clorofila a	mg m ⁻³	169	4.3	0.2	121.6
Amonio	mg/L	159	3.42	0	134.3
DT	°GH	68	13.1	7	28.5
Coliformes fecales	1/100ml	62	528.8	0	4,239
Dureza de Carbonatos	°KH	53	68	7	356
NO₂⁻	mg/L	49	0.1	0	0.9
CT	1/100 ml	44	1,293	0	4,000
PO₄⁻³	mg/L	37	1.1	0.2	1.6
Profundidad del nivel del suelo	m	17	3.2	2.6	4.6
SO₄⁻²	mg/L	10	45.6	13.5	96.8
S-SO₄⁻²	mg/L	10	53.9	16	100
Ca	mg/L	10	108.3	77.5	125.3
Mg	mg/L	10	22.8	6.9	52.6
Na	mg/L	10	204.5	65.3	451

K	mg/L	10	9.9	4	20.6
F	mg/L	10	0.2	0.1	0.3
Br	mg/L	10	1.44	0.6	3
Al	mg/L	10	<0.07	-	0.07
Zn	mg/L	10	0.02	0.004	0.054
Cr	mg/L	10	<0.01	-	0.01
Co	mg/L	10	<0.02	-	0.02
Ni	mg/L	10	<0.03	-	0.03
Cu	mg/L	10	<0.02	-	0.02
Cd	mg/L	10	<0.01	-	0.01
Pb	mg/L	10	<0.1	-	0.1

BDCAPA					
Parámetro	Unidad	Número de Veces Reportada	Valor promedio	Valor Mínimo	Valor Máximo
CE	µS/cm	10,275	1,131	7.8	11,720
Cl⁻	mg/L	10,274	237.2	7.3	1,440
Dureza Ca	mg/L	10,272	225.8	0.1	488
DT	mg/L	10,272	305.8	4.9	936
STD	mg/L	10,264	565.3	6.8	4,236
Dureza Mg	mg/L	9,904	45	0.7	416
pH		9,844	7.2	5.5	9.9

Análisis bivariado

En la Figura 10 se observan los datos que cumplían con los criterios especificados dentro del apartado “diagrama bivariado” de la sección 1.8.1, Capítulo 1. En el diagrama (Figura 10) se muestran un total de 8,862 puntos de muestreo: 270 de la BD, 8,524 de BDCAPA, 4 de agua de lluvia, 3 de agua de mar y 61 de los muestreos utilizados para calcular el índice de calidad del agua, con lo que se estimó un coeficiente de correlación de 0.94 entre ellos. En la misma figura se señalan los sitios de muestreo Cenote 65 av. y Cenote sol Caribe como “aguadas”, cuerpos de agua con una baja tasa de recambio, elevando la CE con relación a los Cl⁻ reportados. Por otro lado, también se reconocen cuerpos de agua con una mayor proporción de Cl⁻ con relación a su CE, siendo estos: Chankanaab III, Sin barda, Pozo el Poblano, el Poblano, San Nicolás y las Moscas. En la figura 11 se retiraron los datos de BD, por lo que se graficaron un total de 8,592 puntos de muestreo y con lo cual se estimó un coeficiente de correlación de 0.98 para la UGA C1.

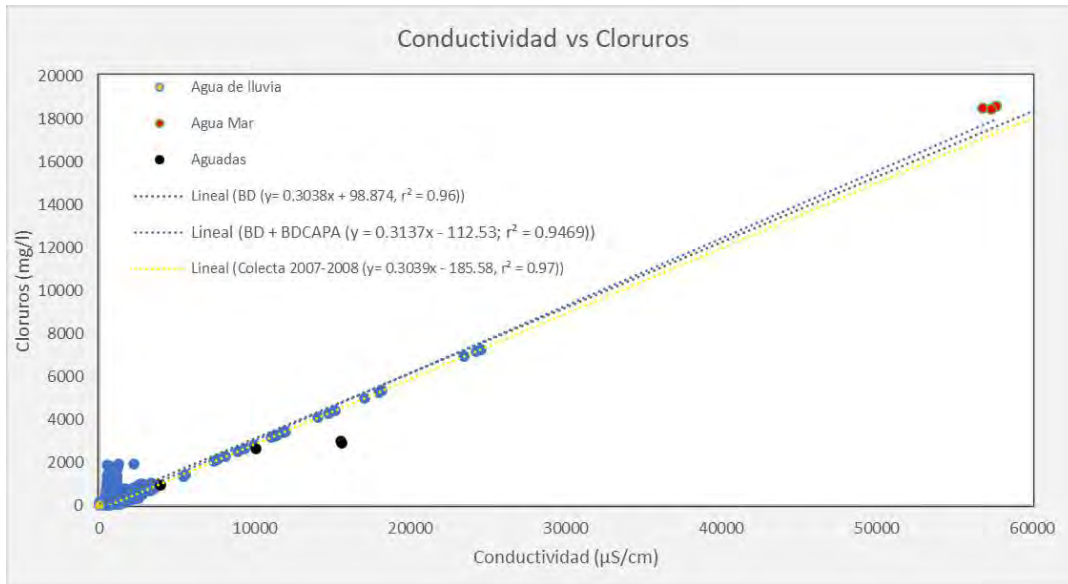


Figura 10. Relación CE vs Cl⁻.

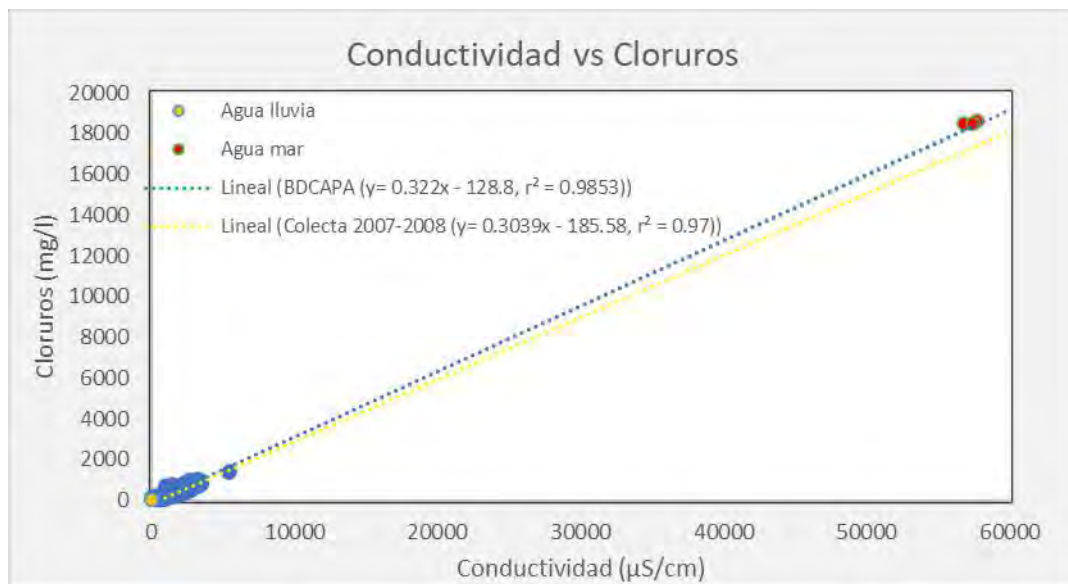
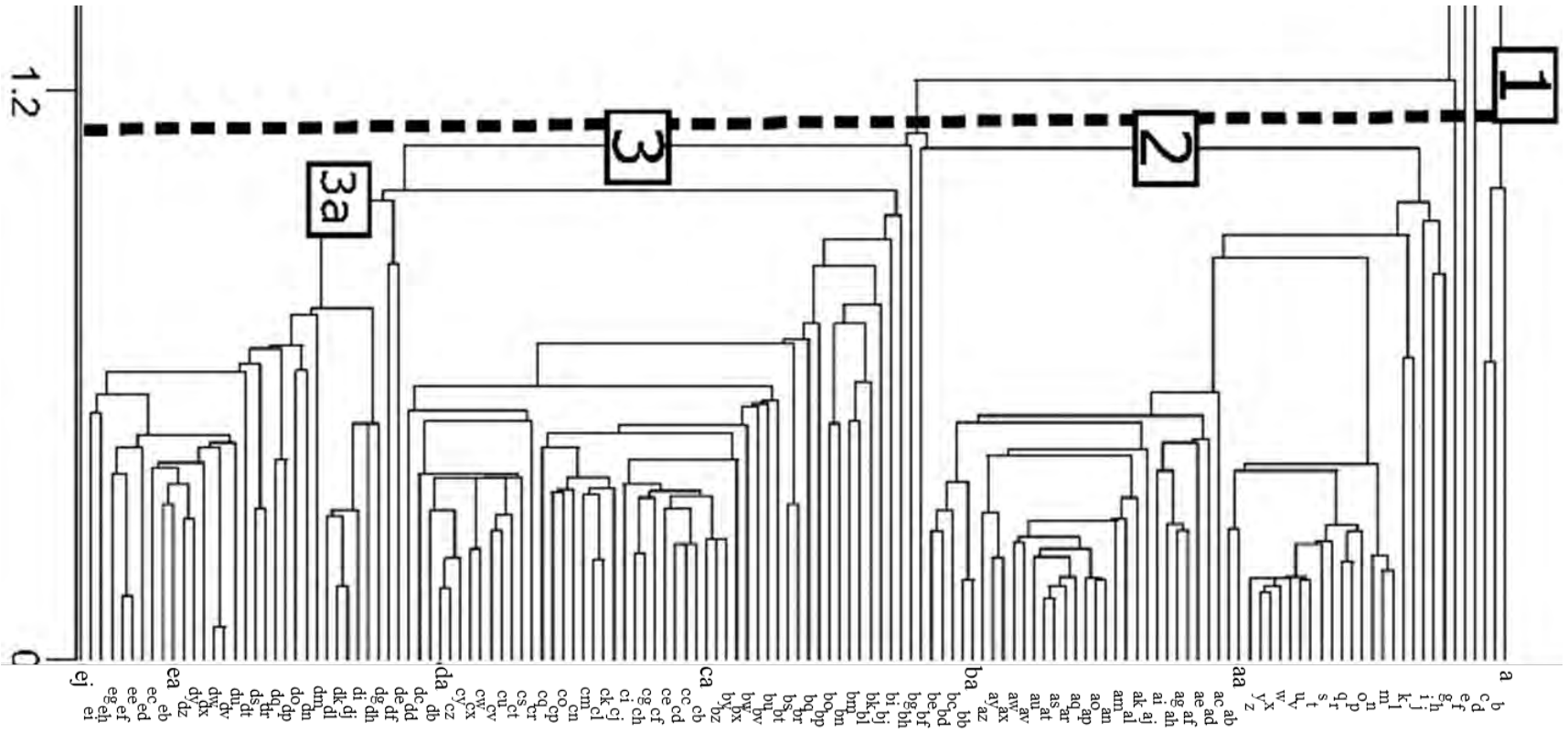


Figura 11. Relación CE vs Cl⁻ en UGA C1.

Análisis de agrupamiento

Después de aplicar los criterios de inclusión a la BD, mencionado en el apartado 1.8.1 “análisis de agrupamiento”, se obtuvieron 1,244 datos de nueve variables indicadoras de calidad de agua pertenecientes a 140 puntos de muestreo en 31 sitios de muestreo. Con estos

datos se elaboró el dendrograma de la Figura 12, en el cual se identificaron 3 grupos y un subgrupo de agua (Figura 12). Se establecieron 50 unidades operacionales de hg - dd como parte del grupo 3 y debido a la ramificación de un número importante de unidades operacionales (32) se les consideró como el subgrupo 3a. De acuerdo con el ACP (Tabla 4), el 46.4% de la variabilidad del sistema es explicado por las variables con mayor contribución al primer componente primario: pH, Cl⁻, clorofila a y amonio.



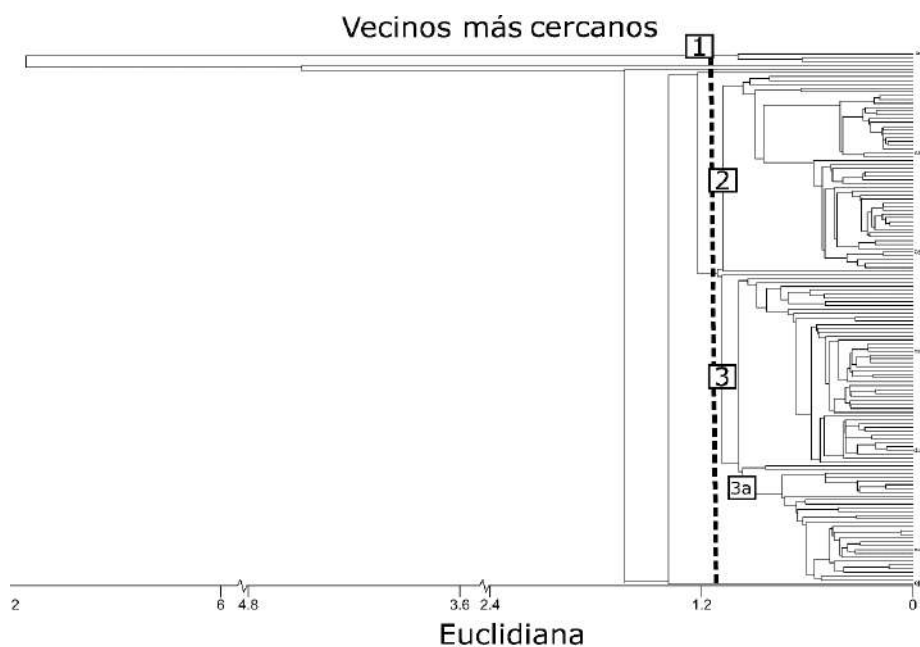


Figura 12. Dendrograma con los 3 grupos y un subgrupo de agua.

Tabla 4. Análisis de Componentes Principales de variables indicadoras de calidad de agua.

	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Eje 5
Eigenvalores	1.592	0.582	0.569	0.394	0.147
Porcentaje de traza	46.404	16.964	16.586	11.473	4.275
Porcentaje acumulado	46.404	63.368	79.954	91.426	95.701
Contribución de las variables a los cinco primeros componentes (ejes 1 a 5)					
	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Eje 5
OD	-0.038	0.471	0.053	0.377	0.3
PSO	-0.034	0.588	0.233	0.244	0.324
Temperatura °C	-0.005	-0.001	-0.001	0.002	-0.008
pH	0.961	-0.093	-0.065	0.12	0.196
CE	-0.036	0.146	0.235	-0.315	0.082
Clorofila a	-0.179	-0.352	-0.108	-0.258	0.868
NO ₃ ⁻	0.022	-0.087	0.364	0.007	-0.066
Amonio	-0.102	-0.506	0.564	0.574	0.048
Cl ⁻	0.171	0.118	0.649	-0.538	-0.012

* Las variables de mayor contribución en negritas

La ubicación de los sitios de muestreo correspondientes para cada grupo del dendrograma se representa en el mapa de la Figura 13. Se observa que los grupos 2 y 3 comparten semejanzas en sus sitios de muestreo, ubicándose en el centro norte de la Isla. El grupo 1 y el subgrupo 3a, pertenecen a sitios de muestreo más asociados con los asentamientos urbanos en el noroeste de la Isla.

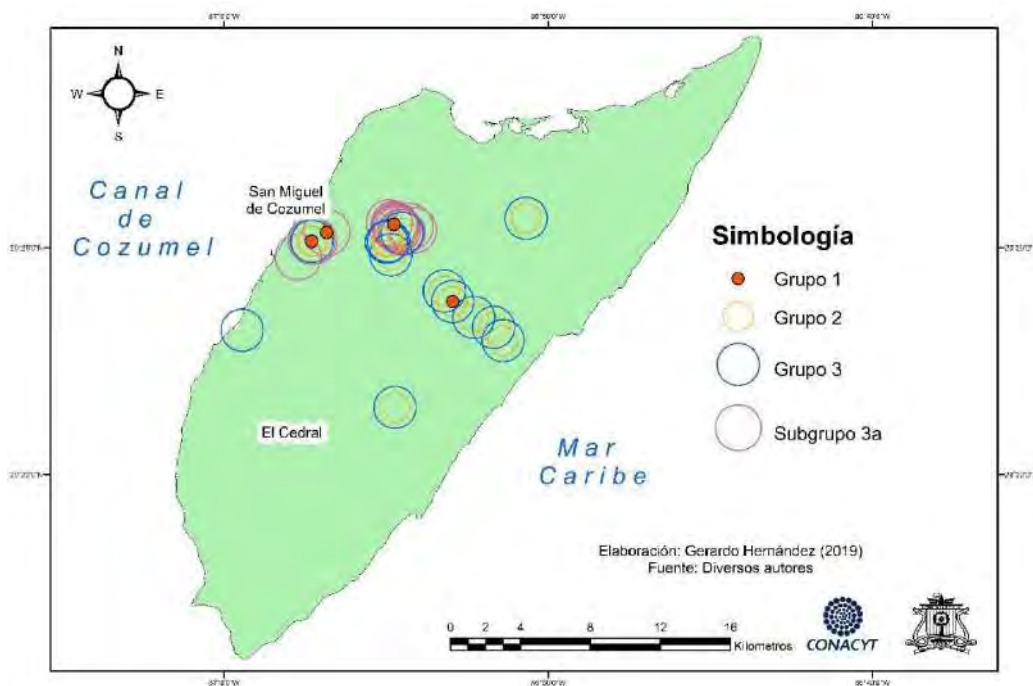


Figura 13. Ubicación de los sitios de muestreo de cada grupo de agua

Las características del dendrograma se muestran en la Tabla 5, en donde se describen: nombre y georeferencia del sitio de muestreo, el grupo al que pertenece, fecha y el número de veces que se reporta. Los grupos con mayores unidades operacionales fueron el grupo 2 y 3 (52 y 50 respectivamente).

Tabla 5. Características de cada uno de los grupos de agua formados en el dendrograma.

Descripción	Número de Unidades operacionales en cada grupo y su fecha de reporte.			
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Subgrupo 3a
Localidad (coordenadas)				
Cenote sin barda (-86.9550, 20.4865)	3 Se06, Se06, Se06	3 My09, Ab09, Mz09	5 En09, Fe09, Di08, No08, Oc08	2 No06, No06
Casa verde (-86.8825, 20.4555)	1 Oc08	4 My09, Ab09, Mz09, Fe09	3 Di08, En09, No09	- -
Cenote maravilla (-86.9473, 20.4911)	1 Di06	-	-	1 Se06
Pozo Luis Estrada (-86.9127, 20.4953)	1 Se06	-	-	1 No06
Las palmas (-86.9143, 20.4796)	-	4 Mz09, Fe09, My09, Ab09	3 En09, Di08, No08	-
San Gervasio entrada (-86.8868, 20.4610)	-	4 Mz09, My09, Fe09, Ab09	3 Di08, En09, No08	-
José Argaez (-86.9085, 20.4907)	-	4 Ab09, Mz09, Fe09, My09	4 No08, Oc08, En09, Di08	-
Sarapes mojados (-86.8716, 20.4474)	-	4 My09, Ab09, Mz09, Fe09	4 Oc08, Di08, En09, No08	-
Manuel Morales (-86.9122, 20.4011)	-	4 Mz09, Fe09, Ab09, My09	4 En09, Di08, No08, Di08	-
El poblano (-86.9156, 20.4862)	-	8 Mz09, My09, Ab09 Mz09, Fe09, My09, Ab09, Fe09	6 En09, No08, No08, Di08 En09 Di08	-
Gallinas (-86.9155, 20.4867)	-	4 Mz09, My09, Ab09, Fe09	3 Di08, En09, No08	-
San Nicolás (-86.8614, 20.4422)	-	4 Mz09, My09, Ab09, Fe09	4 En09, Di08, No08, Oc08	-
Las moscas (-86.8566, 20.4354)	-	4 My09, An09, Mz09, Fe09	4 Oc08, En09, No08, Oc08	-
San Gervasio (-86.8448, 20.4984)	-	4 My09, Ab09, Mz09, Fe09	4 En09, Di08, No08, Oc08	-
Cenote Av. 65-2 (-86.9538, 20.4866)	-	1 Se06	-	3 Di06, Di06, Se06

Cenote 2 Vaquillas (86.9045, 20.4940)	-	-	1	1
			No06	Se06
Chankanaab III (-86.9908, 20.4409)	-	-	2	-
			No08, Oc08	
Cenote Pedro Guaul (-86.9026, 20.4923)	-	-	-	2
				No06, No06
Cenote la escondida (-86.9087, 20.4910)	-	-	-	1
				Se06
Pozo Rosa Ma. Salas (-86.9123, 20.4939)	-	-	-	2
				Se06, No06
Cenote José Argaes (-86.9087, 20.4910)	-	-	-	2
				No06, No06
Pérez Amaya (-86.9108, 20.4927)	-	-	-	2
				No06, No06
Cenote Morales (-86.9107, 20.4927)	-	-	-	1
				Se06
Pozo Doña Jovita contraesquina (-86.9118, 20.4933)	-	-	-	1
				Se06
Cenote de la tiendita (-86.9118, 20.4933)	-	-	-	2
				No06, No06
Cenote Silva (-86.9092, 20.4914)	-	-	-	3
				Se06, No06, No06
Frente Pozo Ro. Ma. Salas (-86.9123, 20.4939)	-	-	-	1
				No06
Cenote Aeropuerto (-86.9153, 20.4960)	-	-	-	3
				No06, Se06, Se06
Pozo Doña Jovita (-86.9116, 20.4946)	-	-	-	1
				Se06
Cenote Rosa Ma. Sálas (-86.9119, 20.4940)	-	-	-	1
				Se06
Cenote Sol Caribe (-86.9619, 20.4785)	-	-	-	2
				Di06, Se06
Rango en el dendrograma	a-e	f-bf	bg-dd	de-ej
Total de Unidades operacionales	5	53	50	32

Atípicos	e	f, g & bf	bg	ej
-----------------	---	-----------	----	----

Nota: Meses: Enero (En), Febrero (Fe), Marzo (Mz), Abril (Ab), Mayo (My), Junio (Jn), Julio (Jl), Agosto (Ag), Septiembre (Se), Octubre (Oc), Noviembre (No) y Diciembre (Di). Años: 2006 (06), 2008 (08) y 2009 (09).

De los resultados observados, los valores promedio de las variables indicadoras de calidad de agua en la Tabla 6 se identifica al grupo 1 con el valor más elevado de clorofila a (46.35 mg m^{-3}) de todos los grupos, al igual que el rango de amonio ($1.5\text{-}134.3 \text{ mg/L}$). Por otra parte, tomando como referencia la NOM-127-SSA1-1994 (NOM), el grupo 3 sólo excede el límite permisible (250 mg/L) en el promedio de Cl^- (781.4 mg/L) en casi la totalidad de los puntos de muestreo; además que el promedio en todos los grupos superó el límite máximo permisible de amonio (0.6079 mg/L) de la NOM con excepción del grupo 3.

Tabla 6. Estadísticos descriptivos de los 3 grupos y un subgrupo de agua.

<i>Valores promedio (mínimo-máximo)</i>	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Subgrupo 3a
OD (mg/l)	4.18 (0.6-11.6)	1.52 (0.1-5.2)	2.05 (0.1-5.7)	1.54 (0.1-4.4)
Oxígeno (%)	38.2 (10.8-87)	24.92 (1.6-76.5)	30.14 (1.8-85.8)	19.9 (1-60.8)
Temperatura (°C)	27.27 (23.9-29)	25.64 (24.1-27.4)	25.64 (23.7-27.2)	25.76 (24.2-27.6)
pH	7.75 (7.1-8.4)	8.1 (7.1-8.5)	7.96 (7.2-8.4)	7.21 (6.9-7.7)
CE (µS/cm)	1105.25 (0.2-2367)	866.02 (422.6-2011)	791.72 (339.7-2787)	631.27 (410-1109)
Clorofila a (mg m ⁻³)	46.35 (1.6-121.6)	2.55 (0.2-29.9)	2.23 (0.3-18.7)	4.38 (0.9-23.6)
N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	3.34 (0.5-5.1)	5.75 (4.6-7.9)	1.79 (1.6-4.4)	1.98 (0.4-6.4)
Amonio (mg/l)	3.93 (1.5-134.3)	4.17 (3-9)	0.18 (0.1-1)	2.03 (0.3-6.4)
Cl ⁻ (mg/l)	256.09 (39.3-543.7)	1811.58 (511.1-6944)	781.41 (5-3172)	91.87 (40-389)

En todos los casos, las pruebas estadísticas mostraron diferencias significativas a una probabilidad del 95%, el grupo 1 vs grupo 2 difirieron en los valores de: clorofila a (H=61.03), N-NO₃⁻ (H=-48.45) y Cl⁻ (H=68.43). El grupo 1 vs el grupo 3 en los valores de: clorofila a (H=56.9) y amonio (H=85.40). El grupo 2 vs el grupo 3 en los valores de N-NO₃⁻ (H=64.97), amonio (H=81.67) y Cl⁻ (H=34.53). El grupo 2 vs el subgrupo 3a se observaron en pH (H=74.09), N-NO₃⁻ (H=61.03), amonio (H=34.66) y Cl⁻ (H=84.04). Finalmente, el grupo 3 vs el subgrupo 3a en pH (H=57.12), amonio (H=-47) y Cl⁻ (H=49.51).

3.3.2 Económico

Las actividades económicas del municipio por sector se distribuyen de la siguiente manera de acuerdo con la Población Económicamente Activa (Ayuntamiento del Municipio de Cozumel, 2019):

Sector primario (Agricultura, Ganadería, Caza y Pesca) 2.03 %

Sector secundario (Industria manufacturera, construcción y electricidad) 16.46 %

Sector Terciario (Comercio y Turismo) 79.9 %

El sector agrícola es de temporal, de bajo rendimiento, para autoconsumo y venta local. En 2016 se sembraron un total de 17 ha con 5 productores beneficiados por el programa PROAGRO (INEGI, 2017). Los principales cultivos son Maíz, Guanábana (*Annona muricata*), Aguacate (*Persea americana*), Nanche (*Byrsonima crassifolia*), Papaya (*Carica papaya*), Coco (*Cocos nucifera*), Guayaba (*Psidium guajava*), Tamarindo (*Tamarindus indica*), Guaya (*Talisia olivaeformis*), Plátano (*Musa paradisiaca*), etc. (Ayuntamiento del Municipio de Cozumel, 2005). También se tiene registro del cultivo de jitomate, limón, chile habanero y hierbabuena (SECTUR, 2013). La ganadería es de tipo intensivo con expansión restringida y regida por el Plan Director de Desarrollo Urbano y el Programa de Ordenamiento Territorial de la Isla. Se ubica principalmente en zonas adyacentes a la actividad agrícola como: en el área del Cedral, en la carretera transversal y en la zona de San Gervasio. Se ha reportado un inventario de aproximadamente 300 cabezas de ganado y 500 caballos, con un total de 32 ranchos (SECTUR, 2013).

El sector pesquero es importante, pero dado a que se ejerce en el mar, su relación con el acuífero insular es poca.

La actividad industrial es básicamente la extracción y triturado de materiales pétreos (Ayuntamiento del Municipio de Cozumel, 2011c) cuya producción es alrededor de 6 millones de toneladas para exportación (SECTUR, 2013).

Por ende, la actividad económica más relevante en la Isla es el turismo. De todos los visitantes, casi el 90% arriban por crucero y el resto por ferry proveniente de Playa del Carmen (Jamal et al., 2010). En 2015 se registró el arribo de 575,055 turistas y 3,391,241

excursionistas (Segrado, González, et al., 2017), mientras que en 2017 se registró la llegada de 4,838,009 visitantes en Cozumel (Ayuntamiento del Municipio de Cozumel, 2019).

Cobertura de agua potable

Una vez que se extrae el agua de los pozos, se transporta hasta la planta potabilizadora a través de una red (aproximadamente 110 km) de tubería de asbesto con diámetros de 2.5 a 14 pulgadas (Ayuntamiento del Municipio de Cozumel, 2006a). En la planta se aplica el tratamiento de cloración.

En Cozumel para el año 2003 (SECTUR, 2013) se tenía estimado que la red de agua potable en la Isla cubría al 97.05 % de la población. De un total de 12,556 registros con medidor: 11,413 son domésticas, 966 comerciales, 30 industriales, 58 de servicio y 58 hoteleras. Sin medidor se registraron 216 domésticas, 26 comerciales, 1 industrial y 1 de servicio. Al 15 de marzo de 2015 el índice de agua entubada para Cozumel es de 0.9723 (INEGI, 2017).

3.3.3 Social

Entrevistas

En la Tabla 7 se muestran el número de entrevistados para cada sector.

Tabla 7. Número de entrevistados y sectores.

Sector	No. de entrevistados
Académico	2
Asociaciones civiles	3
Iniciativa privada	2

Percepción del recurso

- Académicos

En general se observó que los académicos cuentan con información sobre el acuífero en la Isla. Si bien, existe una falta de seguimiento en los trabajos sobre la cantidad y calidad del acuífero; en este sector se incluyen a quienes generan la información y cuentan con acceso a los recursos publicados. Sin embargo, ambos entrevistados coinciden en una falta de

información actualizada, un desconocimiento del volumen real del acuífero, su recarga y la calidad con la que cuenta. Con relación al costo, uno de los entrevistados argumentó que es necesario cobrar con base en la disponibilidad, aunque esto requiere de estudios previos; mientras que el segundo entrevistado mencionó que no está satisfecho con el costo, principalmente porque no observa que se utilice el dinero que cobra CAPA dentro de infraestructura y servicio.

“Mi percepción es que es limitada, no te podría decir si es suficiente o insuficiente, porque pues desconozco la estimación de la cantidad de agua que hay; pero si me parece que tiene una capacidad limitada en términos de la cantidad de agua que puede extraerse por año, en el entendido que puede recargarse etc. Tiene una cierta cantidad que puede ser utilizada de la cual desconozco “- Entrevistado académico #2, agosto 2019.

- Asociaciones Civiles

Con relación a los entrevistados de asociaciones civiles, las declaraciones coinciden con los entrevistados académicos, pues ambos grupos consideran que existe poca información disponible sobre la cantidad y calidad del agua del acuífero. Las fuentes de información en este grupo son: muestreos realizados por las asociaciones en cuerpos de agua (que no son los pozos de CAPA), el haber formado parte de estudios, pertenecer a consejos y/o el conocer información de CAPA. En general, ellos perciben que el acuífero es limitado, aunque desconocen el volumen total de agua almacenado; además expresaron preocupación por la calidad del agua y las intrusiones salinas.

“...Agua, pues hay agua y siempre va a haber agua, el problema es qué calidad de agua vas a tener” - Entrevistado asociación civil #1

Los principales problemas declarados son: la intrusión salina, la contaminación producto de un mal manejo de residuos y la contaminación directa por tuberías de hoteles.

Los entrevistados en este grupo no consideran que el costo por el servicio de agua en la Isla sea caro. De igual manera, todos coincidieron en que el servicio brindado por CAPA es un problema importante; esto, a tal grado que uno de los entrevistados declaró haber cancelado el servicio de abastecimiento (conservando el servicio de drenaje).

“...nosotros no pagamos agua aquí, pagamos drenaje, nos llega la tarifa de CAPA, pero no utilizamos agua de la llave, tenemos pozo y con eso nos es autosuficiente...” -Entrevistado asociación civil #3

- Iniciativa Privada

Con relación a la percepción de los entrevistados en la Iniciativa Privada sobre la cantidad y calidad del agua, fueron dos opiniones diferentes. Por un lado, el entrevistado de iniciativa privada #1 percibió un decremento en la calidad del recurso, pues identificó un aumento en la salinidad del agua distribuida por CAPA. La fuente principal de información del entrevistado es la experiencia propia y de experiencias de otros empresarios. Además, reportan recortes del recurso en el suministro a empresas, quienes están forzadas a adquirir agua potable de fuentes externas como pipas. Con relación al costo del agua en la Isla, el entrevistado de iniciativa privada #1 hizo énfasis en que es necesario pagar con base al consumo y se requiere de un monitoreo sobre el consumo real de cada usuario; tomando como ejemplo los hoteles, en donde identificaron que en ocasiones el medidor sigue facturando metros cúbicos de agua, aun cuando no hay suministro del recurso. Esto es especialmente perjudicial para los hoteles, pues es sabido que deben cubrir altas cuotas mensuales por el recurso hídrico. De acuerdo con el entrevistado iniciativa privada #1, actualmente no existen incentivos para el ahorro de agua en la Isla. Una estrategia para racionalizar el consumo de agua en localidades con alta afluencia turística es promover el ahorro de agua en los hoteles.

El entrevistado de Iniciativa Privada #2 menciona que en tiempo de lluvias se cuenta con una calidad aceptable del agua en el acuífero, aunque en temporada de secas suelen concentrarse contaminantes que reducen su calidad; mientras que la cantidad disponible es buena.

“...respecto a la cantidad, yo te puedo decir que tiene fácil 15 mil metros cúbicos diarios de oferta...” -Entrevistado Iniciativa Privada #2

El entrevistado declaró que uno de los principales problemas en la Isla es el de robo o daño a la infraestructura dentro de la zona de captación; además de la falta de presupuesto para los

operadores y mantenimiento de la infraestructura en CAPA. Este entrevistado declaró que el costo del servicio es demasiado caro:

“... es muy caro el precio actual del agua...Hoy la tarifa doméstica entre un metro cúbico y seis metros cúbicos es de \$180 pesos, ósea si consumes 6 metros cúbicos pagas \$30 pesos por metro cúbico. Ahora imagínate alguien como tú en tu casa y que consumes uno o dos metros cúbicos por mes y que te cobran \$180 pesos por mes, te sale a \$90 pesos cada uno...”

-Entrevistado Iniciativa Privada #2,

Percepción del consumo de agua

- Académicos

Ambos entrevistados académicos declararon que los sectores que más consumen agua en la Isla son: la población y el turismo. También se considera que es un problema el desconocimiento del volumen de agua que se recarga, almacena en el acuífero y los efectos del cambio climático, pues por experiencia empírica se ha detectado un incremento de salinidad en el agua distribuida por CAPA.

“El cambio climático debido a los cambios en los patrones de precipitación, es uno de los problemas que veo a largo plazo y bueno, quizá el problema podría un poco salir de la suposición siempre y cuando supieras cuánta agua tuvieras, como no tienes conocimiento de que tanta agua, bueno en teoría sabes cuánta agua tienes. Si de verdad se empezara a generar conocimiento sobre cuánta agua tienes a lo mejor no importaría mucho si lloviera en 15 años. A lo mejor los cambios en los patrones de precipitación no te afectarían y esa información te serviría para el manejo.” -Entrevistado Académico #1, agosto 2019

- Asociaciones Civiles

Los entrevistados de las asociaciones civiles coincidieron en que el sector urbano y la industria turística son los principales consumidores de agua en la Isla, siendo la población turística flotante y hotelera quienes ejercen una importante presión sobre el recurso.

Entrevistado asociaciones civiles #1: en general opina que hay una percepción en la cual no se cuenta con una conciencia sobre lo limitado del recurso hídrico. Esto lo atribuye a una

cuestión generacional, pues la gente mayor de 20 años tiende a no cuidar el recurso y alega que es necesaria incentivar una educación de cuidado del agua. Considera que a los prestadores de servicios no les importa el cuidado del recurso y que el uso por parte de los turistas es mayor.

Entrevistado asociaciones civiles #2: Considera que en la población no existe un uso racional del agua y lo atribuye a una falta de conocimiento sobre el origen del agua. El entrevistado opina que a las empresas de servicios turísticos no les importa el cuidado ambiental, pues sobreponen la satisfacción del cliente por encima de medidas que contribuyan con el cuidado del recurso. Finalmente opina que a los turistas no les interesa el cuidado del agua, principalmente por la comodidad que representa enjuagarse o bañarse constantemente.

Entrevistado asociaciones civiles #3: Con relación al uso por la población, considera que hay un exceso de población y eso puede incidir sobre la disponibilidad. Menciona que existe un mal manejo por parte de las empresas prestadoras de servicios, aunque se controla el consumo excesivo por la diferencia en la tarifa en comparación con la tarifa doméstica. Finalmente considera que el consumo por parte de los turistas es alto:

“Yo considero que un turista utiliza hasta más agua que un local, porque a final de cuentas el local se baña una vez o dos al día y el turista, entra al agua y sale del agua y se enjuaga. Está sudando porque no aguanta el calor, vuelve a buscar el agua para enjuagarse.” -Entrevistado Asociaciones civiles #3

- Iniciativa Privada

Entrevistado iniciativa privada #2 considera que se ha trabajado sobre la cultura del agua en la población. El uso del agua dependerá de cada prestador de servicios, pues algunos gerentes suelen ser más conscientes, por lo que depende de cada empresa.

Ambos entrevistados coinciden en que no hay una verdadera conciencia del uso del recurso por parte de los turistas. Aunque el entrevistado iniciativa privada #1 si reconoce una diferencia entre los hábitos de turistas de pernocta y de cruceros. Destaca que los turistas de cruceros son más propensos a buscar comodidad y rapidez, por lo que no consideran la conservación de los destinos. Por el contrario, opina que los turistas de pernocta buscan la

conservación del lugar, pues entablan una relación más profunda con los habitantes y el destino.

3.3.4 Modelo para caracterizar a los aspectos relacionados con el recurso hídrico

El modelo con el cual se caracterizó la información recopilada a través de investigación bibliográfica e informantes clave sobre el estado actual del acuífero en UGA C1, el entorno ambiental, el estado del recurso, las actividades socioeconómicas, los servicios de distribución, los usos y tradiciones, marco jurídico y demografía se presenta en la Figura 14. El modelo agrupa indicadores dentro de siete categorías para cada eje del desarrollo sostenible, que junto con los indicadores se basan en elementos del MIRH y SSE, como se especificó en 1.8 materiales y métodos del Capítulo 1. Las categorías del modelo son:

Entorno ambiental: Se consideraron los elementos asociados al cuerpo de agua. Se incluyó información de los rubros: suelo, clima, precipitación, vegetación, cenotes y biota asociada con el acuífero.

Estado del recurso: Se consideraron elementos que describen el estado en el que se encuentra el acuífero. En particular aborda información sobre la cantidad, calidad de agua disponible y amenazas.

Actividades socioeconómicas: Se describen las principales actividades económicas en Cozumel.

Servicios de distribución: Se describen los métodos y la infraestructura con la cual el agua es transportada a los usuarios y después de su uso el cómo es recolectada, así como su destino final. Se incluyó información sobre: infraestructura de la red de distribución, drenaje y los mecanismos de distribución.

Usos y tradiciones: Se describen los métodos y tecnología utilizados para la extracción, así como aspectos sociales relacionados con la visión local del agua; considerando la percepción del recurso, métodos de extracción, usos del recurso, tecnologías, deidades, celebraciones y costumbres.

Jurídico: Abarca los aspectos legales ligados al acuífero y al uso del recurso; incluyendo: leyes, normas, programas, ordenamiento territorial, financiamiento e instituciones.

Demografía: Describe los aspectos ligados a la población en la Isla y su relación con el acuífero, incluyendo: crecimiento poblacional, urbanización, enfermedades asociadas y mitigación.

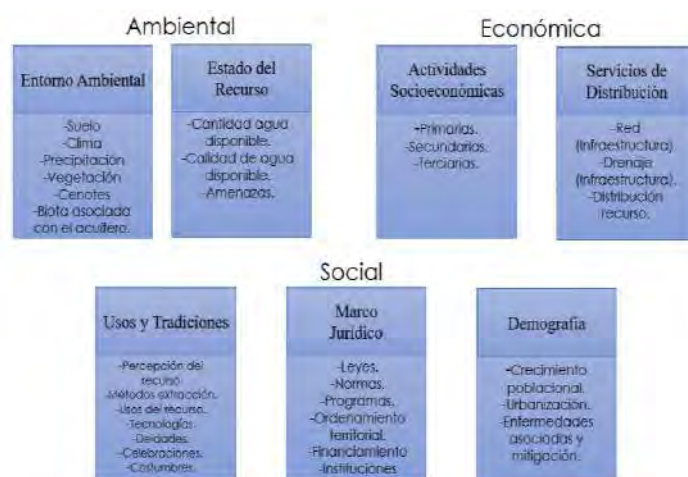


Figura 14.Elementos básicos para considerar en el desarrollo de un modelo de manejo sostenible del acuífero en Cozumel. (Elaboración propia).

3.4 Discusión

3.4.1 Ambiental

Estado de Pozos en UGA C1

De acuerdo con la información presentada sobre el estado de los pozos administrados por CAPA con base en su calidad, se observó un incremento importante en el porcentaje de pozos abatidos y en reposo. Si bien, el decremento en la calidad del agua en los pozos se debe a un adelgazamiento de la capa de agua dulce en el acuífero, se desconoce con certeza el aporte de una serie de factores que han incidido en conjunto. Dentro de estos factores se encuentra el incremento poblacional y económico de la Isla, con el que se aumenta la demanda por el recurso; en conjunto con la falta de estrategias para el manejo del acuífero en Cozumel.

Además, se ha reportado que los efectos del cambio climático pueden incidir sobre la recarga de los acuíferos y con ello, el volumen disponible (Green et al., 2011).

Este escenario en el cual la demanda no puede ser suplida por el acuífero se ha presentado en otras localidades, como en Antigua en donde la demanda sobrepasó la disponibilidad del acuífero, por lo que fue necesario implementar fuentes alternas (desaladoras) que abastecen hasta un 90% de la demanda (CEHI, 2006), incidiendo sobre la economía local. El uso de fuentes alternas para suplir la demanda, reducir los volúmenes de extracción o incrementar los costos del recurso han demostrado impactar de manera importante las actividades económicas (Foster et al., 2015). Por ello, se debe buscar la prevención del abatimiento de la lente de agua dulce en el acuífero a través de estimaciones periódicas y actualizadas sobre los volúmenes sostenibles de extracción y el desarrollo de políticas alineadas con el MIRH (Foster et al., 2017).

Grupos de agua

La información sobre la cantidad y ubicación de los sitios de muestreo de la BD se puede observar en la Figura 9, así como los parámetros y sus valores (Tabla 3). En ellos se puede observar que la mayoría de los sitios de muestreo se encuentran cercanos a zonas urbanas y vías de comunicación. La amplia variación en los rangos de los 39 parámetros indicadores de calidad de agua es un indicio de la heterogeneidad del acuífero en la Isla. Aunque se ha simplificado al acuífero como una lente de agua dulce flotando sobre agua salada (CAPA, n.d.), la información presentada es evidencia de su complejidad, por lo que son necesarios más estudios que contribuyan con la caracterización. Por otra parte, los datos para BDCAPA son menos variantes, siendo la CE, Cl⁻ y dureza Ca los indicadores con mayor número de reportes. Tomando en consideración que los pozos extraen agua de la misma profundidad, la principal variación proviene de las diferencias en el tiempo. Es probable que un mismo pozo muestre signos de abatimiento al reducir la capa de agua dulce y favorecer la intrusión de agua marina profunda, con lo cual se incrementarían los valores de CE y Cl⁻, como se observa en los valores máximos de la Tabla 3.

En las Figuras 10 y 11 se observa que ambas líneas de tendencia azul y verde se encuentran por encima de la línea de tendencia amarilla (colecta 2007-2008). Aunque los cloruros

pueden aparecer de manera natural en el medio ambiente, por lo general se encuentran niveles más elevados en agua de lluvia de zonas costeras e islas debido al aporte por el agua marina, la disolución de partículas existentes en la atmosfera, concentración de agua de lluvia por evaporación y la disolución de minerales (Carroll, 1962; Eriksson, 1952; Sánchez et al., 2016); con lo cual se podría explicar la mayor proporción de cloruros con relación a la conductividad en muestras provenientes de Cozumel. Se han reportado valores de cloruros que fluctúan entre los 70 a 560 mg/L para el estado de Yucatán (Alcocer et al., 1998) y junto con otros iones (Br, Sr y Na) son indicadores de intrusiones salinas, pues generalmente es un ion conservativo con una concentración estándar para agua marina de 20,000 mg/L (Perry et al., 2009; Scholz, 2006).

En la Figura 11 la calidad del agua dentro de la zona de captación mostró una correlación ($r^2=0.98$) mayor entre los puntos de muestreo que en la Figura 10 ($r^2=0.94$); lo cual puede deberse a que en la zona de captación el agua infiltrada es principalmente de lluvia y hay poca influencia de actividades humanas que pudiesen modificar su composición natural. Por el contrario, el menor coeficiente de correlación de la Figura 10 puede deberse a una cercanía de los puntos de muestreo con la zona urbana, la cual pudo influir sobre la calidad del agua analizada. Esto puede ser indicio de una modificación en la calidad del agua del acuífero de Cozumel por influencia antropogénica, evidenciando la vulnerabilidad de la calidad de agua subterránea y con lo cual se debería evitar la urbanización dentro y cerca de la UGA C1. Adicionalmente, algunos resultados de trabajos previos de muestreos de calidad de agua en la zona de pozos administrada por CAPA (Scholz, 2006; Wurl et al., 2003) demuestran procesos de mezcla entre dos tipos predominantes de agua, intrusiones de agua marina y agua subterránea infiltrada de precipitación. Además, en la zona Norte de la Península de Yucatán se ha asociado un incremento en salinidad con la presencia de intrusiones de agua marina (Matthes, 2008). Si bien los resultados no son indicios de intrusiones salinas aún, es notoria la modificación en la calidad del agua observada en la Figura 10 por lo que se recomiendan estudios posteriores que corroboren la influencia de los aportes urbanos sobre la calidad del acuífero y con lo cual se puedan desarrollar estrategias para su mitigación.

Los sitios de muestreo en el mapa de la Figura 13 se complementan con mapas previos en donde se presentan los cuerpos de agua someros en la isla de Cozumel (Infomex, 2018d;

Yáñez-Mendoza et al., 2007). Para un adecuado manejo del recurso, es necesario continuar con el trabajo de georreferenciación de los cuerpos de agua, con lo que se contribuye hacia su caracterización, ubicación y de los volúmenes disponibles.

Con relación a los trabajos realizados en la Isla sobre calidad de agua, es posible clasificarlos en dos grupos: aquellos en donde los muestreos abarcan la mayor parte de la Isla y aquellos en donde se muestrea en un área específica. Desafortunadamente los trabajos en el primer grupo son escasos y con una antigüedad de 13 a 41 años (Lesser et al., 1978; Scholz, 2006). Por ello, son necesarios los estudios actualizados que sean parte de un monitoreo periódico sobre las dinámicas en la calidad del agua en el acuífero de Cozumel. El resto de los trabajos consultados pertenecen a la segunda categoría, en donde se reportan localidades puntuales y mayormente asociadas con zonas urbanas y áreas aledañas al área urbana en Cozumel (Cervantes-Martínez et al., 2015; Guitiérrez-Aguirre et al., 2008; SEMARNAT, 2007).

La composición química del agua en la Península de Yucatán es influenciada por 3 procesos (Back, 1995): 1) la mezcla de agua de lluvia con agua marina, 2) disolución de roca caliza y yeso, 3) contaminación de materia orgánica y drenaje. Por lo general, en sistemas subterráneos cársticos las variables de temperatura, OD, CE y pH suelen ser estables.

En ambientes como lo cenotes, cuando son principalmente lóticos, la temperatura suele ser similar a la temperatura ambiente (24-29°C) (Schmitter-Soto et al., 2002), encontrando en la Península de Yucatán valores promedio de 27.8°C (Pacheco & Cabrera, 1996) y de 24.7 a 28.3 °C (Alcocer et al., 1998); mientras en Cozumel valores dentro del rango de 24.5 a 33.6°C (Scholz, 2006) y de 24.6 a 25.9 °C (Koch et al., 2016). En los valores de la Tabla 6 temperatura en los grupos de agua corresponden con las características de aguas subterráneas en ambientes cársticos, pues están dentro de los rangos previamente reportados.

De acuerdo con información de Alcocer y colaboradores (1998), en cenotes los niveles bajos de saturación de oxígeno ~50% son característicos debido a la actividad biológica (respiración y la oxidación macrobiótica de la materia orgánica), la oxidación química y la baja actividad fotosintética. Todos los PSO de promedios en puntos de muestreo analizados en el dendrograma se encuentran por debajo del 50%, coincidiendo con lo establecido en la literatura. Con relación al OD, se han reportado valores para la Península de Yucatán por debajo de 4 mg/L (Alcocer et al., 1998) y en un rango de 1.8-2.0 mg/L (Escobar-Briones et

al., 1997), mientras que en Cozumel los rangos reportados son de 0.1 a 4.8 mg/L (Gutiérrez-Aguirre et al., 2008) y 6.81 mg/L (Arroyo-Castro et al., 2019); coincidiendo con la información de la Tabla 6.

La CE suele presentarse en un gradiente que aumenta de manera proporcional a la profundidad y conforme se mezcla el agua dulce con salada, hasta que se convierte en agua marina (Gonneea et al., 2014); por lo que los rangos de conductividad se encuentran de 800 a 1,700 $\mu\text{S cm}$ (Cervantes-Martínez, Gutiérrez-Aguirre, Elías-Gutiérrez, et al., 2018) y de 102 a 53,300 $\mu\text{S/cm}$ (Frausto et al., 2008), con lo que se explica la variación dentro de los grupos de la Tabla 6.

El pH en la Península de Yucatán suele ser homogéneo entre 6.8-9 (Frausto et al., 2008), llegando a presentar un gradiente ácido con relación a la profundidad y fluctuaciones por aportes de la precipitación (Alcocer et al., 1998).

En el dendrograma se identificaron a 3 grupos y un subgrupo con base en las similitudes de los valores de sus parámetros indicadores de la calidad del agua. Es importante mencionar que la mayor parte de los puntos de muestreo de la BD no cumplieron los criterios de inclusión por no reportar las coordenadas del muestreo y la profundidad a la que se tomó la muestra. Esta ausencia de geolocalización dificulta la labor de incluir la información en estudios posteriores, por lo que se recomienda ampliamente siempre reportarlos en futuras investigaciones. De acuerdo con el ACP (Tabla 4), los parámetros que describen a los grupos son: pH, clorofila a, Cl^- y amonio. Estos mismos parámetros, junto con N-NO_3^- , son los que de acuerdo con la prueba de Kruskal-Wallis demostraron diferencias significativas entre los grupos de agua establecidos. A continuación, se abordará cada grupo considerando los límites máximos permisibles de calidad descritos en la NOM-127-SSA1-1994 (NOM).

Dentro del dendrograma se puede observar que las cinco primeras unidades operacionales se encuentran separadas del conjunto de datos, por lo que se decidió incluirlas dentro del grupo 1, considerándolos como casos “atípicos”. En estudios similares de análisis de agrupamiento en los cuales se analiza la calidad del agua no se ha establecido un mínimo de unidades operacionales para formar grupos, considerando tres unidades operacionales como parte de un grupo (Pérez et al., 2011) o hasta dos (Coronado-Álvarez et al., 2011). En general, los ambientes cársticos suelen ser sistemas con bajos niveles de clorofila, sin embargo en algunos

cenotes se llegan a presentar condiciones en las que la dinámica de nutrientes se modifica, incrementando su grado trófico (Schmitter-Soto et al., 2002). El grupo 1 se caracteriza por su elevada concentración promedio de clorofila a (46.3 mg m^{-3}) en casi todos los puntos de muestreo y de amonio (3.93 mg/L) en todos sus puntos de muestreo. La clorofila a es un indicador indirecto para la biomasa de organismos fotosintéticos, quienes dependen en mayor medida del fósforo, como nutriente limitante para su crecimiento (Correll, 1999; McCormack et al., 2014; Tank et al., 2017). Pero la disponibilidad del fósforo soluble en ambientes cársticos es limitada, pues en la parte superior de la columna de agua interactúa con las rocas carbonatadas para formar precipitados inaccesibles para organismos responsables de la producción primaria; por lo cual, la mayoría de los sistemas acuáticos en la Península de Yucatán presenta un estado oligotrófico (Hernández-Terrones et al., 2015; Szeroczyńska & Zawisza, 2015). Es por ello que la presencia de niveles elevados de clorofila a en este trabajo puede deberse a las condiciones particulares del sitio de colecta o de aportes de nutrientes antropogénicos. La calidad del agua posiblemente se relacione con el hecho que geográficamente, los sitios de colecta se ubican en zonas aledañas a la zona urbana. La naturaleza abierta o cerrada del cuerpo de agua, influye directamente sobre la cantidad de radiación solar que recibe, por lo que también debe considerarse como un factor en estudios posteriores. En el grupo 1 los valores promedio de amonio (3.93 mg/L) y de Cl^- (256 mg/L) superan los límites máximos permisibles reportados en la NOM para amonio (0.6079 mg/L) en todos los puntos de muestreo y en casi todos los puntos de muestreo para Cl^- (250 mg/L). Con base en la relevancia de los efectos del amonio sobre la salud (Sánchez et al., 2016; Secretaría de Salud, 1996), junto con los niveles de clorofila a y Cl^- , se consideró al grupo 1 con la peor calidad de agua en este trabajo.

El grupo 2 presenta valores en sus parámetros indicadores de calidad de agua que coinciden con rangos para oxígeno, temperatura, pH y conductividad para agua subterránea en la Península de Yucatán. En este grupo, los valores promedio reportados en este estudio para amonio (4.17 mg/L) y cloruros (1811 mg/L) sobrepasan los límites permisibles establecidos en la NOM. Geográficamente se ubica en el área centro-norte de la Isla y es el grupo con el mayor número de unidades operacionales.

El grupo 3 presenta valores similares al grupo 2 en los parámetros de oxígeno, temperatura, pH y conductividad. En este grupo, únicamente el valor promedio de Cl^- (781 mg/L) sobrepasa el límite máximo permisible de la NOM. Cabe destacar que también es el único grupo en donde el nivel promedio de amonio (0.18 mg/L) y en todos los puntos de muestreo (con excepción de uno) se encuentra dentro de los límites permisibles marcados dentro de la NOM. Geográficamente difiere con el grupo 2 en dos sitios de colecta y es el segundo grupo con más unidades operacionales. Se considera a grupo de agua con la mejor calidad, pues los niveles de amonio se encuentran dentro de los máximos permisibles.

En la mayoría de los documentos en los que se aborda el análisis de la cantidad y calidad del agua, se reconoce a la parte centro-norte de Cozumel como la que cuenta con la mejor calidad de agua y en donde se encuentra un espesor máximo de 22 m de agua dulce (Lesser et al., 1978; Scholz, 2006); además de que las características edafológicas de la región favorecen a las aguas con calidad relativamente duras (Martínez & Chávez-Costa, 2003). En zonas cercanas a la línea de costa, como es isla Pasión (ubicada al norte de Cozumel), la columna de agua dulce es de menor espesor, aproximadamente entre 1 y 2 m (Carrillo & Milán, 2012).

Debido a la agrupación generada en el dendrograma y el análisis estadístico, fue posible identificar una diferencia significativa ($\alpha=0.05$) entre los valores promedio de N-NO_3^- , amonio y cloruros del grupo 2 (febrero a mayo en 2009) y grupo 3 (octubre 2008 a febrero 2009), pese a existir una similitud en los sitios de colecta entre ambos grupos. Estos resultados son indicios de una variación en la calidad del agua dentro del acuífero que podría estar influenciada por los picos máximos de precipitación (septiembre-octubre) y estiaje (mayo) en la Isla. Por ello es necesario el desarrollo de trabajos en donde se evalúe la calidad del agua en ciclos anuales, considerando las variables que en este estudio se identificaron como sensibles a variaciones (pH, nitrato, amonio y cloruros).

Por último, el subgrupo 3a presenta una calidad de agua similar con el grupo 3. En el grupo se sobrepasa el límite máximo permisible establecido en la NOM para amonio (0.6079 mg/L) con un valor promedio de 2.03 mg/L. Geográficamente se ubica en la zona urbana de Cozumel. No se considera la mejor calidad en el estudio, debido a los altos niveles de amonio presentes en el 93.7% de los puntos de muestreo pertenecientes a este grupo. Para Cozumel se han reportado niveles altos de amonio (58.05-60.2 mg/L), atribuidos con un posible origen

a desechos humanos (Gutiérrez-Aguirre et al., 2008), por lo que son necesarios estudios posteriores donde se identifique el origen de los niveles elevados de amonio encontrados en el presente trabajo.

Es importante considerar que en los promedios de este trabajo se identificaron niveles elevados de amonio que sobrepasan los límites establecidos en la NOM para la mayoría de los grupos (con excepción del grupo 3) y que en ningún caso se superó el límite máximo para N-NO_3^- . El nitrógeno es considerado un elemento de prioridad cuando se evalúa la calidad de agua para su potabilización dentro de la NOM y Ley de Agua Potable Segura (SDWA) (EPA, 2009); pues está asociado con enfermedades graves producto de la exposición por agua potable contaminada con especies de nitrógeno como amonio, nitritos y nitratos (EPA, 2007). Las principales fuentes de nitrógeno artificiales son: fertilizantes, excretas animales, desechos municipales, industriales y del transporte (Pacheco & Cabrera, 2003); mientras que las fuentes naturales de nitratos son: la vegetación alledaña, como leguminosas (Schmitter-Soto et al., 2002). El nitrato es reconocido como el nutriente más abundante en muestreos de cenotes y áreas pobladas dentro de la Península de Yucatán (Alcocer et al., 1998; Pacheco & Cabrera, 1997), alcanzando concentraciones superiores a 45 mg/L de N-NO_3^- ; aunque también existen trabajos con niveles bajos de N-NO_3^- de hasta 0.09 mg/L (Leal-Bautista et al., 2011).

Las fuentes bibliográficas para estimar los grupos del agua fueron del año 2006 al 2009, por lo que se reconoce una necesidad de información actualizada para tener un panorama certero sobre el estado actual del acuífero.

3.4.2 Económico

Dentro de este apartado se reconoce la falta de información sobre el tema. De acuerdo con la revisión bibliográfica, en Cozumel los estudios en los que se relacionan las actividades económicas con el impacto al acuífero son escasos. Si bien existió un esfuerzo por parte de la SECTUR para fomentar una relación económica sostenible del turismo con el medio ambiente a través de un documento titulado: “Programa Marco para fomentar acciones para restablecer el balance del ciclo del agua en Cozumel” (SECTUR, 2018), la mayor parte de los documentos y esfuerzos parecen estar enfocados en la zona marina y arrecifal; como se

puede ver en documentos producto de proyectos como “Valoración de los Servicios Ecosistémicos de las Áreas Naturales Protegidas Federales en México (EcoValor Mx)” promovidos por la SEMARNAT y la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) (CSF, 2017). Es por esto que son necesarios estudios en donde se evalúe el impacto del turismo (la principal actividad económica) sobre el acuífero, así como de caracterizar el estado actual de sus prácticas con relación al MIRH del sector, pues la actividad puede generar un impacto negativo sobre la disponibilidad del recurso (Gössling, 2015; LaVanchy, 2017). Esto permitirá contar con un punto de partida para integrar al sector y desarrollar estrategias para el MIRH en Cozumel.

Afortunadamente en Cozumel se cuenta con un buen porcentaje de la población con acceso a la red de distribución de agua potable. El acceso al agua potable es uno de los indicadores abordados por la ONU y una parte importante del MIRH (AMA, 2009; WHO & UNICEF, 2017), pues es fundamental para promover la salud dentro de la población.

3.4.3 Social

En aspectos sociales, también se identifica una importante falta de reportes y estudios en los que se vincule la sociedad con el aprovechamiento del recurso en Cozumel. En otros países como Estados Unidos, se han realizado estudios con el propósito de comprender el papel de las creencias de los consumidores hispanos relacionadas con la sequía y los recursos hídricos en la configuración de las percepciones y comportamientos relacionados con el consumo sostenible de agua (Kang et al., 2017). Estudios de esta naturaleza son necesarios en Cozumel para conocer la relación de las características particulares de la población con el uso del agua, para con ello desarrollar estrategias que permitan un avance hacia el MIRH.

Entrevistas

Es importante recalcar que si bien se identificó que todos los sectores de los entrevistados coincidieron en que hace falta información sobre la cantidad y calidad de agua dentro de UGA C1, los entrevistados académicos y asociaciones civiles coincidieron que el sector académico genera la información con apoyo de las asociaciones civiles. Dentro de la iniciativa privada también se genera información sobre la calidad y cantidad de agua, sin embargo, esta no es accesible, pues en general se utiliza para la explotación del recurso con un beneficio económico. Existen reportes en medios de comunicación locales en los que se

difunden noticias como “Cozumel tiene agua dulce para una década más”(Villegas, 2016), aunque se desconoce la información en la que se basan sus declaraciones. Esta falta de información coincide con los resultados de la revisión bibliográfica en donde se reconoce una necesidad de estudios actualizados sobre el estado del acuífero. Desafortunadamente uno de los factores más críticos dentro del MIRH es la falta de información y cuya consecuencia es el pobre manejo del recurso, que se agudiza en países en desarrollo (GWP, 2014). Por ello, se requieren de espacios para la generación y divulgación de información actualizada sobre elementos relacionados con el manejo del acuífero en Cozumel. Con relación al costo del recurso, en todos los sectores se percibió un descontento por la tarifa actual, pues consideran que no hay suficiente información sobre la estimación del costo real y que el pago por la tarifa no se refleja en un servicio de calidad. El costo por el servicio de distribución de agua es una herramienta que se ha utilizado en varias regiones del mundo y cuyos resultados parecieran depender de las características del lugar donde se implemente (Deyà-Tortella et al., 2017; Molinos-Senante & Donoso, 2016). Cuando la demanda de agua no puede satisfacerse por extracción del acuífero, en islas como antigua y Barbuda se ha recurrido a desaladoras, con las cuales se ha incrementado el costo del acceso al agua (Cashman, 2017). Las problemáticas son claras, pues los entrevistados coinciden en que actualmente se presentan los efectos de una falta de MIRH en Cozumel al declarar una reducción en los tiempos de servicio de distribución y un decremento en la calidad del agua que reciben. Además, están conscientes que el volumen es limitado y reconocen que la disponibilidad podría ser un problema importante en un futuro cercano.

En general, los entrevistados coinciden que los principales consumidores de agua en la Isla son el turismo y la población; siendo una de las estrategias de manejo en recientes años el limitar las horas diarias de servicio de distribución de agua en diversas colonias y/o sectores, con lo cual se asegura un menor consumo por parte de los usuarios, aunque no sea voluntario. El caracterizar los patrones de consumo es importante, pues algunos autores han reportado a la población como un consumidor importante de agua en destinos turísticos, el cual puede llegar hasta 10 veces más en países en desarrollo (Gössling et al., 2012). El consumo de agua depende de factores como: las actividades económicas, cultura hídrica y la disponibilidad sobre el recurso. En el caribe, las principales actividades económicas son la agricultura y el turismo, representando el 30 y 13 por ciento de la fuerza laboral regional (Taylor et al., 2012).

Por ello, es importante la adopción de tecnologías que permitan reducir el consumo de agua por parte de las actividades económicas y el sector doméstico, como se ha realizado en otros países en donde se han brindado incentivos y capacitación a hoteles para el ahorro de agua (Deyà & Tirado, 2011; Hadjikakou et al., 2013).

3.4.4 Modelo para caracterizar a los aspectos relacionados con el recurso hídrico

Si bien no existe una solución universal para el MIRH, los modelos para caracterizar los aspectos relacionados con el recurso hídrico resultan una herramienta útil. Aunque en algunos casos de estudio se ha optado por el uso de índices como una herramienta para diagnosticar (PRI, 2007), los modelos también son útiles para transmitir información. En este caso, el modelo funciona como base para un diagnóstico de la zona, aportando metodológicamente con los requisitos para un sistema de información, como la base para incentivar un MIRH (AMA, 2009).

3.5 Conclusiones

El abordar la calidad del agua dentro del acuífero en Cozumel es complicado, primero porque no se ha definido la porción de agua real aprovechable dentro del acuífero en la Isla. Segundo, porque la calidad del agua muestreada puede variar dependiendo de: la temporada del año, la profundidad del muestreo, el lugar e instrumentos utilizados. Finalmente, la profundidad de la capa de agua dulce no es homogénea a lo largo del territorio y no se apega fielmente al principio de Ghyben-herzberg. Esto, pues la disolución del carst no es homogénea, por lo que existirán reservorios de agua dependiendo de la orografía, además de que el espesor puede ser influenciado por la extracción de agua dulce.

En la actualidad, el acuífero de Cozumel se encuentra amenazado por un incremento en el número de pozos abatidos (↑77 %) y en reposo (↑38 %) en la UGA C1.

Con relación a los grupos de agua se concluyó:

El análisis de agrupamiento permitió identificar 4 áreas geográficas dentro del acuífero de Cozumel, que corresponden con 3 grupos y un subgrupo de agua con relación a los muestreos de parámetros indicadores de calidad de agua.

Se identificó al área del centro-norte de la Isla (grupo 3) como la que presentó mejor calidad de agua, tomando como referencia a la NOM-127-SSA1-1994, en los muestreos realizados de octubre 2008 a febrero 2009.

En la región urbana y aledaña se identificaron los muestreos del grupo 1, como los que presentan la peor calidad de agua, tomando como referencia a la NOM-127-SSA1-1994.

Dentro del análisis se identificaron parámetros sensibles a variaciones temporales (nitratos, amonio y cloruros), por lo que se sugiere que en estudios posteriores se realice una caracterización del acuífero en temporada de lluvias y en temporada de estiaje, tomando en cuenta a estos parámetros.

Es necesario generar información que contribuya con la actualización de los grupos de agua reportados en este trabajo. Para ello se recomienda que los autores reporten la ubicación de los sitios de muestreo mediante coordenadas georeferenciadas y la profundidad en la columna de agua en la que se toman las muestras.

La caracterización del acuífero y sus dinámicas es la base para desarrollar un programa de monitoreo del estado del acuífero que incentive al desarrollo de estrategias para su manejo sustentable.

Al considerar el estado de los pozos en UGA C1 y los grupos de agua se puede identificar que las actuales estrategias para el manejo de los pozos no han resultado y son insostenibles, pues de no contar con un plan para el restablecimiento activo de la capa de agua dulce, en un futuro el número de pozos con calidad viable para la extracción se reducirá significativamente.

Con relación a los aspectos socioeconómicos se concluyó:

La escasez de agua en la Isla podría requerir de fuentes alternas para suplir la demanda, que podrían elevar el costo de distribución y perjudicar el desarrollo de actividades económicas.

En la Isla la principal actividad económica es el turismo y existe una cobertura del 97.05% de los servicios de distribución de agua potable en la población.

Algunas estrategias para el MIRH fueron mencionadas por los usuarios entrevistados, siendo estas: generación y divulgación de información actualizada sobre calidad y cantidad de agua

disponible, incentivos para promover un uso responsable y caracterizar el consumo de los sectores usuarios del recurso.

La información referente sobre el estado actual del acuífero en UGA C1, el entorno ambiental, el estado del recurso, las actividades socioeconómicas, los servicios de distribución, los usos y tradiciones, marco jurídico y demografía relacionados con el agua recopilada a través de investigación bibliográfica e informantes clave se caracterizó dentro de un modelo que contribuye como una base para el modelo sostenible del acuífero.

En general, en este Capítulo se analizó la información publicada sobre el acuífero y los elementos con los que se relaciona en Cozumel. Se observó una necesidad de actualizar información sobre el área de pozos, incrementando la variedad de parámetros indicadores de calidad del agua para una mejor descripción del estado actual del acuífero.

Capítulo 4 – Hacia la sostenibilidad del acuífero de Cozumel. *

4.1 Introducción

El agua es un recurso finito, por lo que son una prioridad los trabajos en los cuales se busca su sostenibilidad. Para lograr un desarrollo sostenible en las localidades es necesario aprovechar al máximo los recursos para minimizar el impacto ambiental (Gikas & Tchobanoglous, 2009). Esto requiere de planeación y una constante actualización de información, junto con la caracterización de elementos relacionados con el acuífero. Los índices son un recurso efectivo dentro del estudio de sostenibilidad, pues se han posicionado como una herramienta efectiva de análisis de información, además de poderse adecuar con las condiciones del área de estudio.

En la Península de Yucatán, el 98.5% del agua dulce utilizada por la población proviene de fuentes subterráneas (CONAGUA, 2015b). Por ello, uno de los elementos importantes al abordar la sostenibilidad de los acuíferos es la calidad del agua (Gikas & Tchobanoglous, 2009). Dentro de los ambientes cársticos, la calidad del agua es altamente vulnerable debido a las altas tasas de infiltración por la porosidad de la roca (Medici et al., 2019). En la región de la Península de Yucatán se ha reportado la presencia de contaminantes asociados con las actividades turísticas y las malas prácticas en el manejo del agua de residuo (Isaac-Márquez et al., 1994; Leal-Bautista et al., 2013; Medina-Moreno et al., 2014; Metcalfe et al., 2011). Por ello, se requiere de una evaluación actualizada que permita identificar variaciones sobre la calidad del agua.

En general, es necesario identificar las prácticas que favorecen un ambiente de sostenibilidad y que se relacionan con el acuífero. Para ello se han desarrollado índices como el ISAC, con el cual es posible identificar el estado de las prácticas hacia un manejo sostenible, considerando elementos como el manejo de los desperdicios en el relleno municipal.

En Cozumel también se requiere de evaluar el volumen de agua residual tratada, los costos por los servicios de distribución del agua y el consumo por usuario. Con esto, se permite

*Información de este capítulo se complementa con el artículo del Anexo 8.

tener un panorama integrativo sobre los diferentes elementos que se relacionan con el estado del acuífero en la Isla.

Complementariamente con los estudios sobre calidad, se requieren trabajos en donde se estimen los volúmenes disponibles dentro de los acuíferos. Las características geológicas de los ambientes cársticos no favorecen la presencia de cuerpos de agua superficiales, por lo que los mayores volúmenes se encuentran en el subsuelo. En Cozumel, se han estimado volúmenes del acuífero entre 42 y 48 Mm³ con salinidades menores a 1,000 ppm (Lesser et al., 1978), 475 Mm³ (Scholz, 2006) y 92,128,990 m³/año como volumen disponible para nuevas concesiones (CONAGUA, 2015a). Esta disponibilidad del agua dulce se relaciona directamente con la precipitación, por lo que también es necesario estimar cambios dentro de los patrones de lluvia, escorrentía y presencia de intrusiones salinas (Cervantes-Martínez, 2007).

En el Capítulo pasado se identificaron los elementos de mayor importancia y que requerían de ser actualizados para contribuir con el MIRH en Cozumel. Por ello, dentro del presente Capítulo se analizó la calidad del agua, prácticas para la sostenibilidad, indicadores de consumo y las dinámicas de indicadores hidrometeorológicos e hídricos; con lo que se actualizó su estado, contribuyendo al modelo sostenible del acuífero.

4.2 Objetivos

Adeuar indicadores sobre el estado del acuífero (índice de calidad de agua), entorno ambiental (índice de sostenibilidad de ambientes cársticos), servicios de distribución (tratamiento de agua y costo), usos y tradiciones (consumo de agua) del agua para la isla de Cozumel.

Determinar el estado actual de la calidad del agua en UGA C1 (índice de calidad de agua), sostenibilidad (índice de sostenibilidad de ambientes cársticos), tratamiento agua residuo, costo, consumo por la población y turismo, adecuando indicadores para la isla de Cozumel.

4.3 Resultados

4.3.1 Índice de Calidad del Agua (ICA)

Los muestreos para este trabajo se realizaron en Octubre de 2019. Después de los muestreos y análisis de calidad de los pozos en UGA C1, se presentan los estadísticos descriptivos para los parámetros analizados dentro de la Tabla 8.

Tabla 8. Estadísticos descriptivos para los parámetros de calidad de agua muestreados en UGA C1.

		No. muestras	Min	Max	Promedio	Desv Est.	Coefficiente de variación	Sesgo
Temperatura	°C	61	24	29	25.3	0.7	2.8	2.6
OD	mg/L	60	0.5	7.13	3.2	1.7	51.4	0.4
CE	μS/cm	61	640	5407	1379.1	729.4	52.9	3.3
STD	mg/L	61	416	3529	893	477	53.4	3.3
Salinidad	ppt	61	0.31	2.93	0.7	0.4	57.5	3.4
pH		61	6.5	7.75	7.1	0.2	3.5	0.3
Cl ⁻	mg/L	61	50.2	1365	231.1	207.3	89.7	3.2
N-NO ₂ ⁻	mg/L	61	0	0.052	0.011	0.011	102.3	1.1
N-NO ₃ ⁻	mg/L	61	0	2.99	0.18	0.5	289.9	4.6
DT	como CaCO ₃	50	240	720	324	75.1	23.2	3.5
SO ₄ ²⁻	mg/L	32	10.5	318.4	54.1	56.9	105.2	3.4

En la Figura 15 se muestra el estado de los pozos observado durante el trabajo de muestreo, donde se les puede clasificar como: 1) inaccesibles por crecimiento excesivo de vegetación, 2) ausencia de equipo para el bombeo, 3) ausencia de estructura eléctrica. Los pozos sin acceso por el crecimiento excesivo de vegetación se concentraron cerca de la carretera principal en el eje 4, así como en las áreas más alejadas del eje 2, 4 y 5. Los pozos sin bombas se observaron en todos los ejes, con excepción del primero y con una mayor concentración en el tercero. Finalmente, en el eje 2 se presentó la mayor incidencia de pozos con ausencia de cables para la conducción de electricidad o con instalaciones no funcionales.

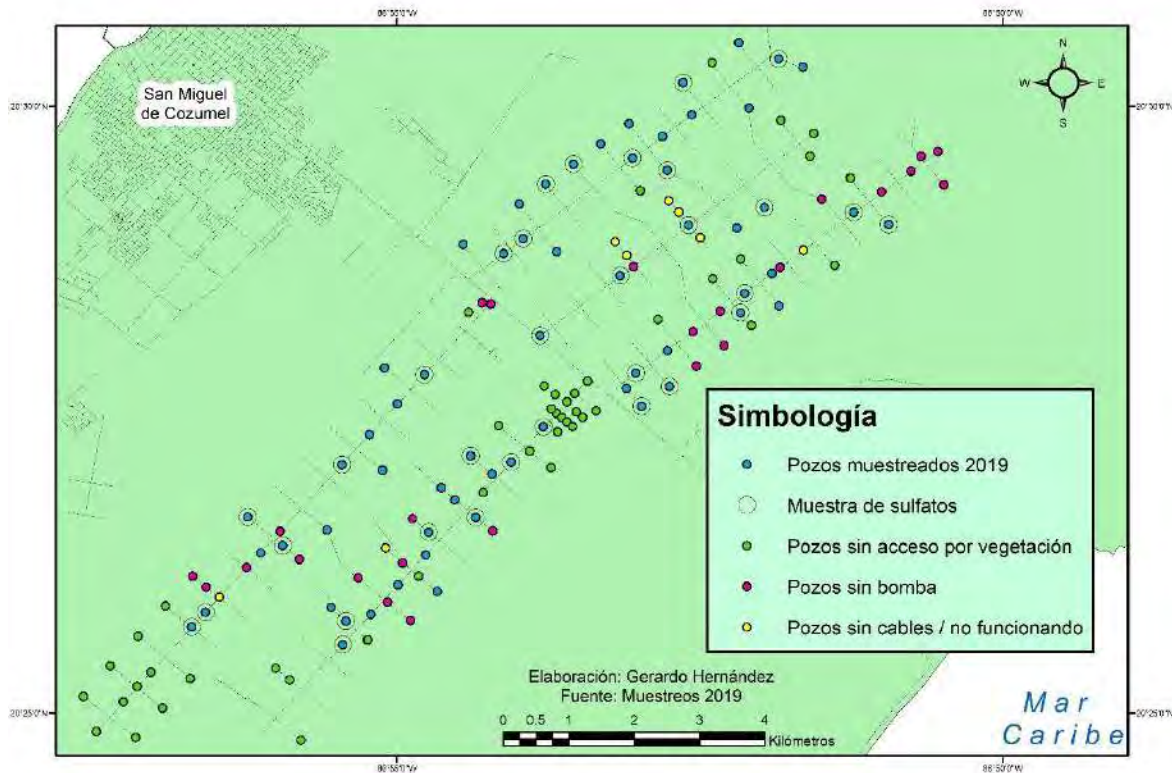


Figura 15. Pozos muestreados y problemáticas observadas dentro del área.

En la Figura 16 se muestra el resultado de la aplicación del ICA en muestras de agua de la UGA C1. Los mayores valores de ICA (66, 88 y 156) se determinaron dentro del área cercana con la carretera transversal y en el área más cercana de los pozos con la ciudad de Cozumel. En general, los valores de ICA variaron entre 17 y 156, con un promedio de 39.

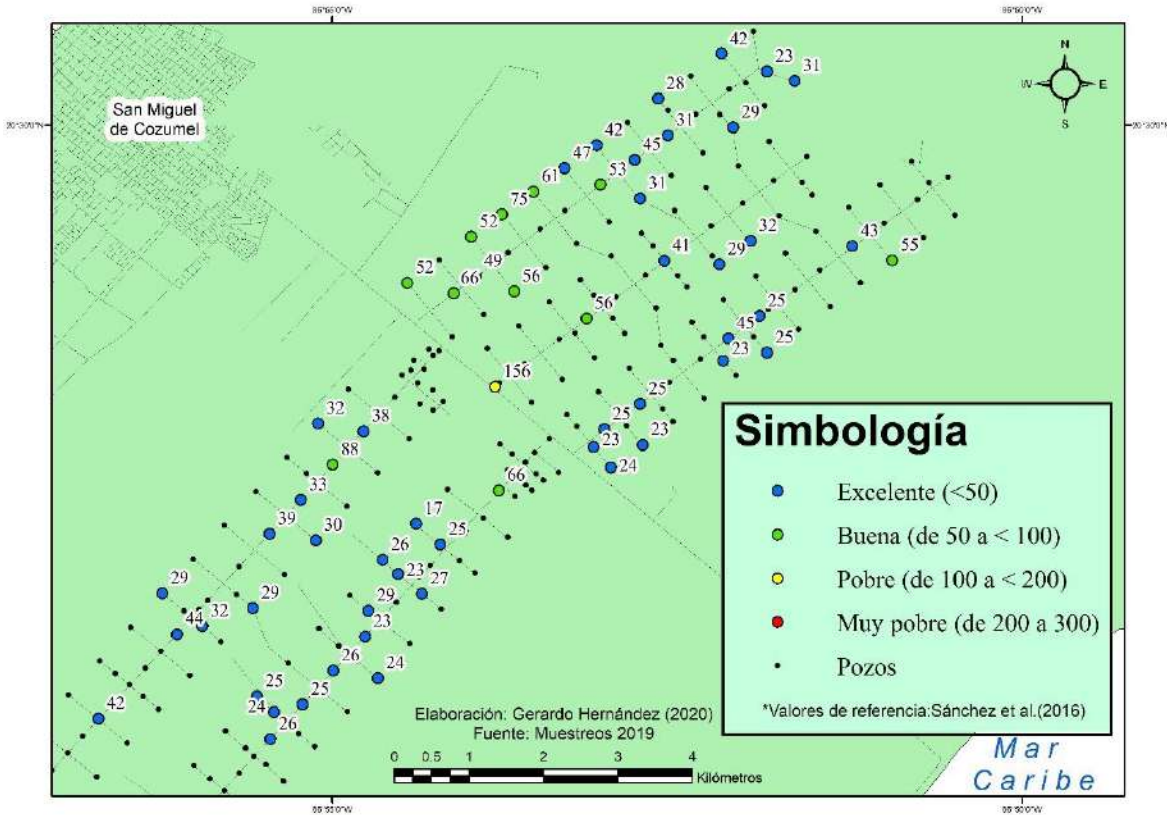


Figura 16. Índice de Calidad del Agua para los pozos muestreados.

4.3.2 Índice de Sostenibilidad de Ambientes Cársticos (ISAC)

En la Tabla 9 se presenta al ISAC que fue adecuado a las condiciones de Cozumel que se utilizó en este estudio. En la tabla se observan los valores objetivo, que son los valores a los que se debe aspirar con relación a las prácticas de sostenibilidad. Cabe mencionar que se tomaron de referencia los valores objetivo del índice original, así como los métodos de estimación, mismos que se pueden consultar en el Anexo 2. La mayoría de los valores objetivo originales se conservaron, aunque para los indicadores propuestos se tuvieron que crear nuevos valores objetivo. En la Figura 17 se representan los indicadores, el año de la publicación de la información con la que se estimó el indicador y el estado actual hacia el logro de prácticas sostenibles en Cozumel.

Tabla 9. Indicadores, valores objetivo, puntuación y fecha de la información consultada del ISAC adecuado para Cozumel.

	Dominio social	Valor objetivo	Puntuación	Fecha de la información consultada
S1	Propiedad local, privada o pública, de cuevas y manantiales	>80 %	100%	1992;2008 a la fecha
S2	Locales empleados en trabajos relacionados con el carst	>80 %	>80%	2017
S3	Acceso equitativo de la población a los recursos hídricos cársticos	100%	97.23%	2015
S4	Hablantes nativos con acceso a recursos cársticos	100%	100%	2015
S5	Disposiciones educativas sobre acuíferos por parte de instituciones públicas	Una vez al año	Alcanzado	2019
S6	Porcentaje de instalaciones turísticas relacionadas con el carst que ofrecen educación informal	100%	80%	2019
S7	Gobiernos locales que ofrecen información relacionada con el carst en sitios web o mediante publicaciones.	100%	30%	2020
S8	Espacios públicos para la integración de los usuarios en la toma de decisiones del acuífero	Una vez al año	Ninguno	2020
S9	Porcentaje de hogares con prácticas de ahorro de agua (captación de agua de lluvia, reductores de caudal en duchas y volumen en sanitarios, etc.).	100%	Desconocido	--
S10	Tendencias de consumo por sectores (informes CAPA)	Estable	Incremento	2005-2018
	Dominio ambiental	Valor objetivo	Puntuación	Fecha de la información consultada
En1	Aumento de la cantidad de área cárstica boscosa o de vegetación nativa	↑20%	Alcanzado	2010-2018
En2	Aumento de la cantidad de área cárstica designada como protegida	↑20%	Estable	2011 a la fecha date
En3	Biodiversidad de especies en medio cárstico	Estable	Decremento	1989-2020
En4	Conservación de zonas riparias alrededor de cenotes	>75%	Desconocido	2018
En5	Disminución del número de pozos dañados según lo medido por indicadores biológicos o de calidad del agua.	↓20%	↑77	2013-2018
En6	Porcentaje de pozos de abastecimiento de agua que se monitorean	100%	43%	2018
En7	Rellenos sanitarios actuales que evitan la contaminación de las aguas subterráneas	100%	100%	2019
En8	Recolección de aguas residuales de todos los hogares en áreas urbanas	100%	98%	2015
En9	Tratamiento terciario de aguas residuales urbanas	100%	0%	2016, 2019, 2020
En10	Cumplimiento de las regulaciones locales	100%	Alcanzado	2017, 2020
En11	Monitoreo de recarga estimada anual	Una vez al año	Alcanzado	1990-2019
En12	Total anual de infraestructura deteriorada y accesibilidad de pozos en UGA C1	0%	30%	2019
En13	Protección de cuencas hidrográficas cársticas, como que el área de drenaje para alimentar el agua subterránea está protegida de actividades que podrían dañar el acuífero.	100%	100%	2008,2010 a la fecha

	Dominio económico	Valor objetivo	Puntuación	Fecha de la información consultada
Ec1	Extracción de agua de acuíferos y manantiales	Estable	Incremento	2005-2018
Ec2	Área de urbanización y carreteras	Estable	↑40%	2004-2016
Ec3	Silvicultura en el paisaje cárstico que es sostenible	100%	>80%	1994-2016
Ec4	Aumento del número de emprendimientos ecoturísticos relacionados con el paisaje cárstico	↑20%	Desconocido	-
Ec5	Porcentaje de comercios y hoteles con prácticas de ahorro de agua (captación de agua de lluvia, reductores de caudal en duchas y volumen en aseos ...)	100%	20%	2014 a la fecha
Ec6	Porcentaje de volumen de agua extraída perdido debido a fugas	<10%	26%	2005-2018
Ec7	Empleo de locales en provisión de agua	>80 %	>80%	2017

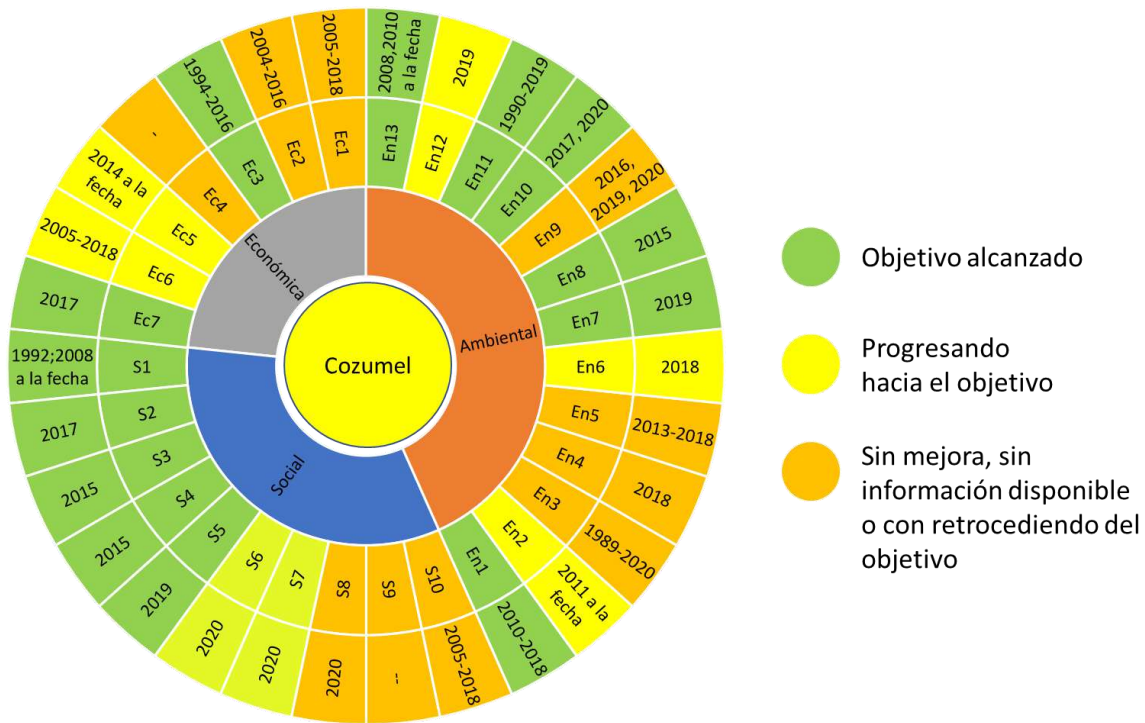


Figura 17. Tablero de avances actuales hacia la sustentabilidad en Cozumel.

A continuación, los resultados individuales para cada indicador se presentan con detalle:

- Dominio social

S1. Propiedad local, privada o pública, de cuevas y manantiales

De acuerdo con la LAN, la autoridad y administración de los cuerpos de agua nacionales es responsabilidad del gobierno federal (DOF, 2020b). En México, la población no puede poseer

un acuífero, aunque estos cuerpos de agua se pueden explotar mediante el trámite de una concesión y un registro dentro del REPDA, con lo que se permite un volumen de extracción máximo anual por usuario. Hasta junio 2020, en el REPDA había un total de 199 concesiones para la extracción de agua, con 7 adicionales para la descarga. Además, desde el 2008 todo el territorio de la Isla se dividió en UGAs, estableciendo la C1 para la recarga del acuífero y preservación de la calidad y cantidad de agua (Ayuntamiento del Municipio de Cozumel, 2008). Por esto, la calificación asignada al indicador fue de 100%.

S2. Locales empleados en trabajos relacionados con el carst

En 2010, Cozumel contaba con 79,535 personas, de las cuales 36,993 eran población económicamente activa y 23,086 no lo eran. La población económicamente activa se define como: “Personas de 15 y más años de edad que tuvieron vínculo con la actividad económica o que lo buscaron en la semana de referencia, por lo que se encontraban ocupadas o desocupadas” (INEGI, 2017: p.401).

En este indicador, fue complicado encontrar información más reciente para la Isla, pues por lo general se publican reportes a nivel estado de Quintana Roo y no por municipio. Por ello, en 2017 el estado de Quintana Roo contaba con un total de 66.2% de población económicamente activa y sólo 2.7% que no lo eran. Esto sugiere que previo a la pandemia, Quintana Roo contaba con una baja tasa de desempleo. Con base en estos datos y que al momento no se han encontrado evidencias de exclusión de gente local para algún empleo se le asignó una calificación de >80%.

S3. Acceso equitativo de la población a los recursos hídricos cársticos

Como se estableció en el Capítulo 3, en 2015 el 97.23% de la población contaba con acceso al agua potable en Cozumel. Cabe mencionar que también existen compañías privadas que desalan el agua de mar y ofrecen el servicio de distribución de pipas de agua con volúmenes de hasta 20,000 litros. Los compradores de estas pipas se han identificado principalmente como los hoteles y las compañías que ofrecen servicios turísticos. Debido a que las compañías desaladoras extraen agua marina profunda, no influyen sobre el volumen del acuífero. Por estas razones se le asignó una calificación de 97.3% al indicador.

S4. Hablantes nativos con acceso a recursos cársticos

Cozumel era un lugar de peregrinaje para la diosa Ix Chel de la cultura Maya (Patel, 2005). Desde entonces, los nativos hablantes de Maya han vivido en la Isla. Hoy en día, en varias familias es común el hablar Maya, aunque principalmente por parte de los adultos mayores. En 2015, un 31.1% de la población de la Isla era de origen indígena o nativa (SEDETUS, 2019). Considerando que esto representa casi un tercio de la población, se debe reconocer la necesidad de estrategias dentro del MIRH que tomen en cuenta a este sector de la población. Debido a que la porción de la población que habla Maya se encuentra distribuida dentro de la Isla y no hay evidencia de marginamiento para este grupo, se consideran dentro de lo planteado en S3. Puesto que la mayor parte de la población cuentan con acceso a los recursos, se le asignó una calificación del 100%.

S5. Disposiciones educativas sobre acuíferos por parte de instituciones públicas

En 2015-2016, Cozumel contaba con 40 instalaciones educativas (INEGI, 2017) y para el 2021 con tres universidades registradas: Universidad de Quintana Roo (UQRoo), Universidad Parthenon y la Universidad Interamericana Para El Desarrollo (UNID) (SIC, 2021). Previo a la pandemia, al menos una vez al año, en la UQRoo se organizaban eventos en donde alumnos de preparatorias (públicas y privadas) atendían pláticas informativas y/o presentaban proyectos de ciencia relacionados con el medio ambiente.

Además, algunas escuelas primarias llevan a los estudiantes en viajes al planetario local donde hay una sala temática del agua (administrada por CAPA) en la que se abordan temas sobre el uso responsable del agua, el acuífero de la Isla y el medio ambiente. Los centros educativos, además de las universidades, han integrado dentro de su programa educativo la temática del medio ambiente.

En las charlas informativas en el planetario impartidas por personal de CAPA y en las Universidades se abordan las particularidades del acuífero de la Isla. Junto con el Dr. Cervantes se han realizado charlas informativas, asegurando que los estudiantes comprendan las particularidades del acuífero y el impacto de sus acciones en la calidad y cantidad del agua. Para este indicador se estableció como puntaje una vez al año, que en 2019 se alcanzó.

S6. Porcentaje de instalaciones turísticas relacionadas con el carst que ofrecen educación informal

Para abordar este indicador se consideraron las siguientes instalaciones turísticas: Museo local, ruinas de San Gervasio, planetario, parques de conservación local (Chankanaab, Punta sur y Punta Norte) y empresas locales de atracción turística (Pueblo del Maíz).

Todas las instalaciones mencionadas anteriormente cuentan con algún grado de información educativa sobre el acuífero o la Isla. Existe un importante sector del turismo que se enfoca en actividades ubicadas en el mar, como el snorkel y el buceo, donde las empresas ofrecen visitas guiadas a arrecifes de coral y acceso a playas de arena. La mayoría de los guías que ofrecen estos servicios no brindan educación informal relacionada con el carst o el acuífero a menos que sea parte de los objetivos de la empresa, como lo es para “Eco-Divers” y “Sand dollar sports”, quienes enfatizan en la biodiversidad y conservación de los arrecifes. Aunque la mayoría de las instalaciones turísticas terrestres ofrecen algún grado de educación informal, las principales compañías de buceo y actividades acuáticas no lo hacen, por lo que se le asignó al indicador una calificación de 80%. Esto considerando que las empresas locales de atracción turística representan sólo 1 parte de los cinco grupos de instalaciones turísticas consideradas.

S7. Gobiernos locales que ofrecen información relacionada con el carst en sitios web o mediante publicaciones

No hay mucha información sobre el carst en el sitio web del gobierno local o mediante publicaciones. CAPA es la institución que gestiona el agua en la Isla y produce la mayoría de las publicaciones sobre este tema. La mayor parte de su divulgación se realiza en la sala temática del agua en el planetario y a través de la publicación de comunicados sobre interrupciones del servicio de agua y/o tubería de distribución. La organización también utiliza la radio local para comunicar el mantenimiento de la infraestructura y la interrupción del servicio. En la cuenta de twitter de CAPA Cozumel no se han actualizado mensajes desde 2014, aunque la cuenta de Facebook está actualizada y activa. No existe una página web específica de CAPA para Cozumel, solo una general con todos los municipios a los que brinda servicio. La Fundación de Parques y Museos de Cozumel (FPMC) cuenta con un Centro de Conservación y Educación Ambiental que se dedica a la planificación de proyectos y ejecución de acciones de conservación de los ambientes naturales de la Isla (FPMC, 2021).

En el centro se abarcan los recursos naturales y no se centran exclusivamente en el agua. Tomando como base a el gobierno municipal, CAPA y FPMC; considerando en cada uno sus publicaciones en página web, publicaciones impresas, redes sociales y radio, se estimó que sólo se ofrece información relacionada con el carst en el 30% de los elementos considerados.

S8. Espacios públicos para la integración de los usuarios en la toma de decisiones del acuífero

Actualmente, existen pocos esfuerzos para integrar a los usuarios del acuífero en el proceso de toma de decisiones. Hubo un esfuerzo denominado “agenda del agua” en 2018 (Anexo 5) donde participantes de siete sectores, entre ellos la Universidad de Quintana Roo, el Ayuntamiento local y organizaciones sociales se reunieron para discutir el estado del recurso hídrico. Sin embargo, desde entonces no se han realizado reuniones, aunque es indispensable el desarrollo de estrategias integrales multisectoriales para el manejo sostenible del recurso (Hernández-Flores et al., 2020). El objetivo de este indicador es que un evento se lleve a cabo una vez al año, aunque en 2020 no se cumplió.

S9. Porcentaje de hogares con prácticas de ahorro de agua (captación de agua de lluvia, reductores de caudal en duchas y volumen en sanitarios, etc.).

Si bien la SECTUR ha manifestado la importancia de la aplicación de estas prácticas (SECTUR, 2018), a la fecha no se han encontrado datos sobre el porcentaje de viviendas en las que se han implementado prácticas para el ahorro de agua. Aunque no es común ver sistemas de recolección de agua de lluvia en la Isla, los cabezales de ducha que ahorran agua se pueden comprar en las ferreterías locales. Se alienta a otros proyectos de investigación a estimar este indicador, para el cual se desconoce la puntuación real.

S10. Tendencias de consumo por sectores (informes CAPA)

El consumo de agua por los diferentes sectores se abordó en este Capítulo. La meta para el indicador se planteó como estable o sin tendencia para todos los sectores, mientras que en la fecha analizada se encontró una tendencia creciente para servicios generales y comercial. Además no se identificaron estrategias para mitigar estas tendencias crecientes o mantener los sectores con tendencias estables, por lo que no existe un progreso hacia este objetivo.

- Dominio ambiental

En1. Aumento de la cantidad de área cárstica boscosa o de vegetación nativa

Debido al limitado espacio físico de la Isla y que la mayor parte de su superficie no está habitada, es difícil aumentar las áreas boscosas. La mayoría de las zonas sin habitantes tienen bosques nativos. Aunque el crecimiento socioeconómico requiere la remoción de bosques para el desarrollo de áreas urbanas, esto ocurre principalmente en el perímetro de la mancha urbana. Hay registros de reforestación con especies nativas, pero son pequeños en comparación con la superficie total de la Isla (20 palmeras guano nativas) (Ayuntamiento del Municipio de Cozumel, 2021).

Por otro lado, esfuerzos de reforestación con mayor impacto se han realizado en el área de manglar. Luego del paso de los huracanes Wilma (2005) y Emily (1988), una parte importante de la vegetación de manglar se perdió en la Laguna de Colombia, en la parte sur de la Isla (CONAFOR, 2017). Actualmente, la FPMC trabaja para restaurar 800 hectáreas con la ayuda de la población y con énfasis en jóvenes y niños, a quienes se les enseña sobre la importancia ambiental de estos ecosistemas (FPMC, 2019). Las imágenes de satélite no muestran ninguna disminución o aumento significativo en el área boscosa en el sur de la Isla durante 2010 y 2018 (Figuras 18a y 18b). A diferencia de otras áreas de México, Cozumel tiene casi el 90% de su superficie cubierta de vegetación nativa (Martínez et al., 2018). Con base en esta información, se le asignó como cumplido al indicador.

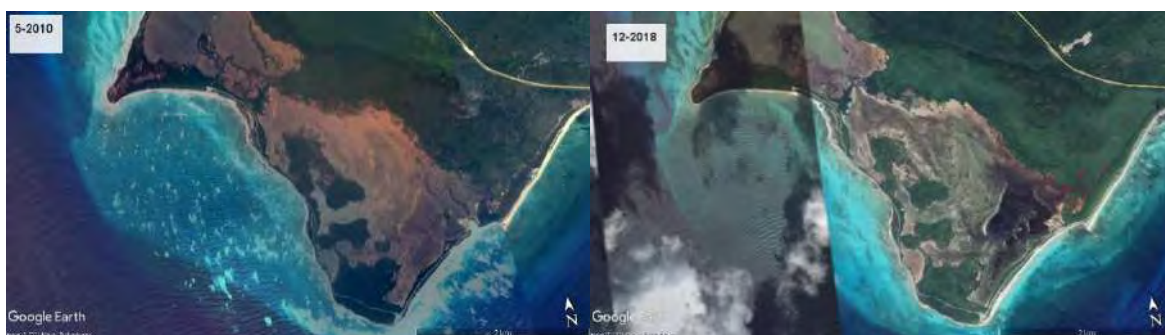


Figura 18. Imágenes de satélite del área sur de la Isla en mayo-2010(a) y diciembre-2018(b).

En2. Aumento de la cantidad de área cárstica designada como protegida

Como se indicó en el Capítulo 2, Cozumel cuenta con diferentes instrumentos de gestión como POEL (Figura 19). El POEL fue creado en 2008 y actualizado en 2011, donde se crearon UGA A15, A16 y C12 y se modificaron UGA C4, A8, A9 y A11 (Ayuntamiento del Municipio de Cozumel, 2011a). Por esta razón, aunque las áreas protegidas en la Isla existen, estas no han aumentado desde 2011 por lo que calificamos el indicador como en un avance hacia la meta.

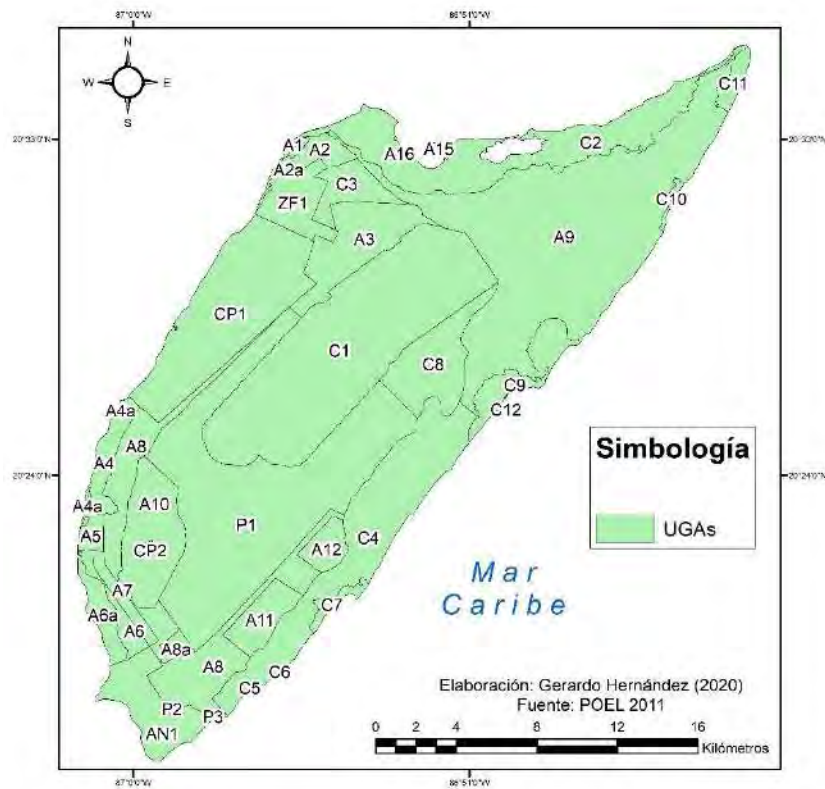


Figura 19. Ubicación de las UGAs en Cozumel.

En3. Biodiversidad de especies en medio cárstico

Cozumel tiene la mayor cantidad de especies endémicas para una isla en México, un total de 804: 289 especies de peces, 27 fauna endémica (7 mamíferos, 19 aves y 1 reptil), 12 especies de distribución restringida y 328 aves, de las cuales 85 son migratorias (Chávez-Costa & Collantes, 2003; SENER, 2015). Las especies asociadas con el agua dulce se abordaron en el Capítulo 1. Existen reportes sobre la vegetación (Escalante, 1996; Téllez et al., 1989), mamíferos (Cuarón et al., 2004; Engstrom et al., 2015), especies introducidas (Machkour-

M'Rabet et al., 2017; Vázquez-Domínguez et al., 2012) y nuevas especies descubiertas, como hongos (Garza & Ojeda, 2020). Aun así, existen reportes sobre 38 especies amenazadas como mamíferos, crustáceos y aves (Martínez-Morales et al., 2009; SENER, 2015) debido a la contaminación ambiental, caza y especies introducidas. Las especies introducidas son uno de los principales problemas para la biodiversidad de la Isla, pues ejemplares de boa y tarántula elegans compiten y depredan especies nativas (Cuarón et al., 2004; Machkour-M'Rabet et al., 2017). Está ha sido una de las razones por las cuales especies como el hocofaisán, mapache enano y ratón local (*Reithrodontomys spectabilis*) están seriamente amenazadas, mientras que una especie de ratón (*Peromyscus leucopus cozumelae*) podría estar extinta (Martínez et al., 2018). Debido a que se reportan especies en peligro de extinción o posiblemente extintas en la Isla, se asignó una puntuación de disminución al indicador.

En4. Conservación de zonas riparias alrededor de cenotes

La información sobre los cenotes se aborda en el Capítulo 1. La mayoría de los cenotes no están siendo monitoreados y aún se desconoce su estado actual de conservación.

En5. Disminución del número de pozos dañados según lo medido por indicadores biológicos o de calidad del agua.

La información sobre el estado de los pozos administrados por CAPA se aborda en el Capítulo 3. Ha habido un aumento importante de pozos deteriorados y en reposo de 2013 a 2018, por lo que se le calificó en retroceso del objetivo.

En6. Porcentaje de pozos de abastecimiento de agua que se monitorean

La frecuencia y el monitoreo de los pozos en UGA C1 se describen mejor en el Capítulo 1, mientras que el estado actual de los pozos que se evaluaron durante el trabajo de campo se trata en este Capítulo. Estos resultados son evidencia de que no todos los pozos están siendo monitoreados y que quizás solo se monitorean 116 (43%) en estado operativo (Infomex, 2018a). Por esto se le clasifica en progreso hacia el objetivo.

En7. Rellenos sanitarios actuales que evitan la contaminación de las aguas subterráneas

Existe un relleno sanitario principal en la Isla, ubicado al sureste y que actualmente es administrado por una empresa autorizada llamada Promotora Ambiental de la Laguna (PASA). Según un trabajador entrevistado en 2019, PASA cuenta con un monitoreo

constante a los lixiviados y gases al área cercana. Procesan los residuos sólidos urbanos mediante confinamiento y cobertura, esto dentro de cinco procesos base. El primero comienza con el corte, carga y acarreo de esa cobertura, seguido de la compactación de los residuos dentro de la celda y de la cobertura de estos residuos por un tractor. Cada celda que cuenta con toda la infraestructura para evitar que los lixiviados lleguen al subsuelo y contaminen el acuífero, para prevenir el impacto hacia el nivel freático. Los lixiviados se tratan mediante un proceso de recirculación, donde primero se descomponen y se conducen a través de desagües de captación, estos son llevados a un punto inferior de la celda que también está impermeabilizado y que puede ser una unidad de contención o una cisterna. En esos puntos bajos las bombas sumergibles detectan cuando el nivel es operacionalmente alto para comenzar a bombear el lixiviado hacia el área de la laguna, estas lagunas son selladas y ahí se almacena y controla el líquido. Esta laguna sirve para el almacenamiento, pues los trabajadores usan gradualmente otra bomba que envía el lixiviado de regreso a la celda de la macrounidad a través de una tubería de 4 pulgadas y mediante un sistema de 83 rociadores, donde las partículas de lixiviado se vuelven tan livianas que básicamente se evaporan. Lo que no se evapora se precipita en la unidad de microcélulas y se reincorpora al proceso. Por estos motivos, este indicador se considera cumplido en 2019.

En8. Recolección de aguas residuales de todos los hogares en áreas urbanas

Según la información obtenida por solicitud de información (Infomex, 2015), la ciudad de Cozumel tiene una cobertura de red de alcantarillado sanitario del 98.7%; Esta red abastece a 10 estaciones de bombeo distribuidas por toda la ciudad. Al 15 de marzo de 2015, el índice de drenaje de Cozumel es 0.9893 (INEGI, 2017), por lo que se clasifica como alcanzado.

En9. Tratamiento terciario de aguas residuales urbanas

Según lo publicado por el Centro de Estudios de Derecho e Investigaciones Parlamentarias (CEDIP), los tratamientos de aguas residuales industriales se componen de tres tipos de tratamiento. En cuanto al tratamiento de aguas residuales, considera 4 niveles de tratamiento: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento de nivel 4 (para eliminar el exceso de nutrientes que favorecen el crecimiento de la flora acuática, como el fósforo y el nitrógeno) (Garmendia, 2019).

En un documento de la CONAGUA del 2016, en ese año Cozumel tenía solo 2 plantas de tratamiento de aguas residuales: San Miguelito y Hotel Reef, en las cuales se utilizan lodos activos como proceso de tratamiento. Este mismo documento señala que a nivel nacional, solo 3 plantas de tratamiento (0.16%) utilizan proceso de tratamiento terciario, ninguna de las cuales se ubica en el estado de Quintana Roo. En un informe del estado general de la planta de tratamiento San Miguelito publicado por CAPA (Ochoa, 2020), los procesos de la planta de tratamiento se expresan como: Pretratamiento, Biofiltración, Reactor biológico, sedimentación secundaria-clarificador y tanque de contacto con cloro. Este último se informa como no operativo hasta el día del informe (20 de enero de 2020). Debido al estado no operativo de una desinfección y la ausencia de un proceso de remoción de nutrientes como último paso del proceso de la planta de tratamiento de aguas residuales en Cozumel, no se puede considerar la presencia de un tratamiento terciario de aguas residuales. Además no existen planes para la implementación del tratamiento terciario en la Isla, por lo que se le asigno como objetivo no cumplido.

En10. Cumplimiento de las regulaciones locales

Las regulaciones federales son atendidas por la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) que está a cargo de la ley ambiental. En las infracciones o faltas generalmente se aplican multas o días de prisión. Las regulaciones locales están alineadas con las federales y se establecen dentro del Reglamento de Medio Ambiente y Ecología del municipio de Cozumel, Quintana Roo (Ayuntamiento del Municipio de Cozumel, 2006b). Se ha multado a personas por delitos ambientales, tales como: conducir sobre sitios de anidación de tortugas (Ayuntamiento del Municipio de Cozumel, 2020), así como a empresas navales por no contar con autorización o excepción de impacto ambiental para realizar nuevas construcciones (Excélsior, 2017). Otra política implementada debido a las elevadas llegadas de turistas son las tarifas ambientales, que están destinadas a utilizar el dinero recaudado para ser utilizado en programas de preservación. En Cozumel el derecho al saneamiento ambiental tiene como objetivo prioritario: lograr que todos los visitantes de la Isla contribuyan con la preservación y sostenibilidad del destino turístico. Durante el 2019, los turistas que pasaron una noche o más en Cozumel ya pagaron este Derecho. A partir de 2020 también pagaron los turistas que estuvieron menos de 24 horas en la Isla. Para las personas que permanecen menos de 24 horas en el Municipio, el Derecho equivale al 15% del valor de la Unidad de Medida

y Actualización (U.M.A.) diario (actualmente \$ 13.03) por persona. Los usuarios de habitaciones de hotel, posadas o pensiones, hostales y moteles seguirán pagando el 30% del valor de la U.M.A. diario (actualmente \$ 26.06) por habitación por noche ocupada. Por estos motivos, se consideró cumplido el objetivo.

En11. Monitoreo de recarga estimada anual

Este indicador se describe mejor en el Capítulo actual dentro del apartado de dinámica de recarga, extracción y consumo. Como se estimó para el período 1990-2019, se calificó como alcanzado.

En12. Infraestructura anual total deteriorada y accesibilidad de pozos en UGA C1

Debido a los resultados en esta tesis y como complemento de la En6, es importante considerar el porcentaje de pozos cuyo acceso se ve afectado por falta de mantenimiento del área y vandalismo de la infraestructura. Como se indica en los resultados de este Capítulo (Sección 4.3.1) se identificaron un total de 79 (30%) pozos con dificultad para el monitoreo de la calidad del agua: 46 con crecimiento excesivo de vegetación, 25 sin bomba de agua y 8 con falta de cableado eléctrico, como es mostrado en la Figura 15.

En13. Protección de cuencas hidrográficas cársticas

Cozumel es parte de la cobertura legal que brinda la federación mexicana que hace cumplir los delitos contra el medio ambiente y la gestión ambiental; en el Código penal federal, Título vigésimo quinto, delitos contra el medio ambiente y la gestión ambiental (PROFEPA, 2010) Artículo 416.- Se impondrá pena de uno a nueve años de prisión y equivalente a trescientos a tres mil días como multa a quien descargue, deposite o infiltra, autoriza u ordena, aguas residuales, líquidos químicos o bioquímicos, residuos o contaminantes en suelos, subsuelos, aguas marinas, ríos, cuencas, embarcaciones u otros embalses o arroyos de jurisdicción federal, que provoquen riesgo de daño o perjuicio a los recursos naturales, flora, fauna, calidad del agua, a los ecosistemas o al medio ambiente. En el caso de aguas que se depositen, fluyan en o hacia un espacio natural protegido, "se aumentará la prisión hasta tres años más y la sanción económica hasta el equivalente a mil días de multa".

Asimismo, la protección que brinda la PDU a la UGA C1 que tiene como finalidad principal: Conservar la cobertura natural para asegurar, en cantidad y calidad, la recarga del acuífero.

También establece que UGA C1 no es compatible con: Bienes inmuebles hoteleros / residenciales; Minería; Agrícola; Ecoturismo; Centro de población; Industrial; Bosque; Acuicultura (Ayuntamiento del Municipio de Cozumel, 2008). Por toda esta cobertura legal, se calificó al indicador como objetivo alcanzado.

- Dominio económico

Ec1. Extracción de agua de acuíferos y manantiales

Los resultados de esta tesis muestran una tendencia creciente significativa ($Z = 8.94$) del volumen de agua mensual extraída de los pozos gestionados por CAPA entre 2005 y 2018, explicado con detalle en el Capítulo 4. Debido a la tendencia creciente en la extracción y la ausencia de medidas específicas para mitigarlo, se clasificó como objetivo no alcanzado.

Ec2. Área de urbanización y carreteras

La longitud de la red vial según el tipo de camino y superficie rodante reportada para Cozumel al 2016 fue de 65 km (INEGI, 2017).

En la Isla solo existen dos caminos asfaltados: uno recorre la mitad sur de la Isla bordeando su perímetro por aproximadamente 50 km, mismo que se conecta con un tramo de 14.5 km que cruza desde San Miguel hasta el extremo oriental y que forma una ruta a través de la parte central y sur de la Isla. La otra carretera asfaltada tiene 7 km de longitud y va de San Miguel a Punta Norte, pasando por la zona hotelera norte. Hay un camino más, de 3.5 km de largo, asfaltado solo en su primera mitad; va desde la zona hotelera norte hasta la planta de tratamiento de aguas residuales y continúa por otros 1.8 km hasta Laguna Ciega (CAPA, n.d.). Según estimaciones satelitales de la Isla, ha habido un aumento del 40% en el área urbana de la ciudad de Cozumel (Figura 20a y 20b) que se concentra hacia el centro. Debido al aumento en el área de urbanización, se calificó al indicador como no alcanzado.



Figura 20. Imágenes de la ciudad de Cozumel de diciembre-2004(a) y enero-2016(b).

Ec3. Silvicultura en el paisaje cárstico que es sostenible

La tala selectiva de los árboles nativos más grandes es difícil de cuantificar debido a la falta de información. La mayor parte del manejo forestal se enfoca en preservar lo que ya existe con poca o ninguna reforestación. Algunas personas en la Isla todavía usan leña para cocinar y generalmente la compran o cortan ellos mismos en áreas forestales, por lo que el impacto en la vegetación en general es mínimo. Las imágenes de satélite comparativas parecen respaldar esta afirmación (Figura 21a y 21b). Por ello, se calificó al indicador como alcanzado.

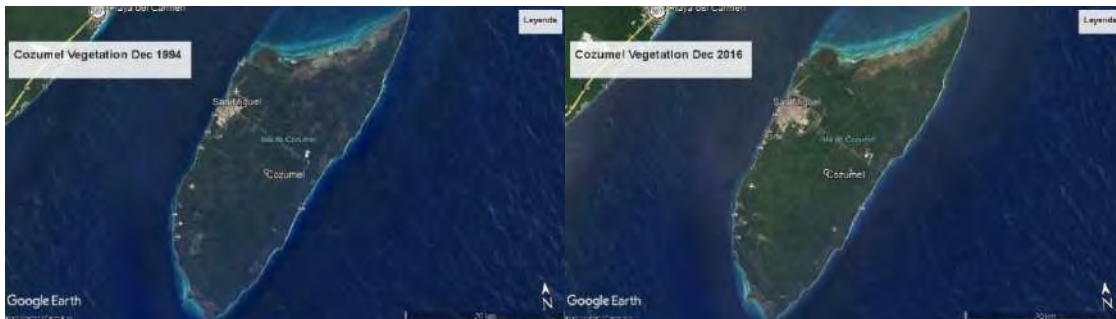


Figura 21. Imágenes de satélite de la vegetación en Cozumel en diciembre-1994(a) y diciembre-2016(b).

Ec4. Aumento del número de emprendimientos ecoturísticos relacionados con el ambiente cárstico

La mayoría de las actividades turísticas están relacionadas con el buceo y el esnórquel, sin embargo, el turismo se ha diversificado dentro de las actividades del interior como: paseos en bicicleta, observación de aves, ecoparques, caminatas y carreras. Se presentó una solicitud a la Cámara de Comercio local para estimar el número de empresas de ecoturismo

relacionadas con el ambiente cárstico dentro de un período de tiempo, aunque no se recibió respuesta. Por ello se calificó como desconocido al indicador.

Ec5. Porcentaje de comercios y hoteles con prácticas de ahorro de agua (captación de agua de lluvia, reductores de caudal en duchas y volumen en aseos ...)

Los resultados de las entrevistas en el Capítulo 3 indicaron que los hoteles en Cozumel están interesados en conocer sobre prácticas de ahorro de agua para reducir costos y volúmenes de consumo. En diciembre de 2016 se reportaron un total de 49 hoteles para Cozumel (INEGI, 2017) y un número desconocido de establecimientos comerciales. Se presentó y aceptó una solicitud a la Asociación de Hoteles de Cozumel (AHC) para estimar cuántos de sus miembros han implementado prácticas de ahorro de agua. La AHC está formada por 20 hoteles asociados con más de 3,000 habitaciones. Alrededor del 60% de los hoteles asociados están distribuidos en la zona hotelera norte de la Isla, mientras que en el centro se cuenta con un servicio de drenaje público y solo el 4% tiene un sistema de ósmosis inversa. Aproximadamente el 30% de los hoteles socios que se encuentran ubicados en la zona hotelera sur cuentan con algún sistema para el saneamiento y eliminación de los contaminantes presentes en el agua, es decir, con una planta de tratamiento de aguas residuales y un sistema de ósmosis inversa. Un 100% de los socios llevan a cabo medidas para el uso y cuidado eficiente del agua en sus instalaciones. En cuanto al período de tiempo en el que comenzaron a implementar estas prácticas se refirieron a los años 1992, 2005 y 2014 (AHC, 2021). Desafortunadamente se desconoce el total de establecimientos comerciales que utilizan prácticas de ahorro de agua. De los 49 hoteles reportados en 2016, solo 20 (40%) se sabe con certeza que han implementado prácticas de ahorro de agua. Considerando tanto el comercio como los hoteles, se asignó al indicador la puntuación del 20% y en progreso hacia los objetivos.

Ec6. Porcentaje de volumen de agua extraída perdido debido a fugas

De acuerdo con una entrevista al Sr. Buenfil, Subgerente Técnico de CAPA en 2014, un 26% (18% pérdidas técnicas y 8% pérdidas comerciales) del total de agua extraída y depurada se pierde por el sistema de distribución (SENER, 2015). Las fugas estimadas de 2005 a 2018 se tratan en la sección 4.4.4. También debe tenerse en cuenta que las fugas, pueden deberse a un mal funcionamiento de las válvulas de los inodoros y pueden representar hasta el 20.2%

de las ineficiencias del agua (Mayer et al., 1999). Aunque el porcentaje en promedio de agua perdida por fugas se ha mantenido en 26%, se realizan trabajos de mantenimiento a la red de distribución por CAPA; es por esto que se calificó como progresando hacia el objetivo.

Ec7. Empleo de locales en provisión de agua

Como se indica en S2, el empleo y el suministro de agua son > 80%, por lo que se clasificó como cumplido al objetivo.

4.3.3 Indicadores de servicios de distribución

Manejo de aguas residuales

En la Tabla 10 se muestran los volúmenes anuales del 2005 al 2018 de agua residual tratada por la planta de tratamiento San Miguelito en Cozumel. Durante este periodo se trató en promedio un 103% del agua que ingresó.

Tabla 10. Porcentajes anuales de tratamiento de agua residual.

Year	Var	Vtart	% ART
2018	2,244.4	2,356.7	105.0
2017	2,335.2	2,012.0	86.2
2016	2,354.9	2,465.5	104.7
2015	2,417.8	2,497.7	103.3
2014	2,385.7	2,439.8	102.3
2013	2,293.3	3,223.0	140.5
2012	2,353.1	2,575.2	109.4
2011	2,354.7	2,362.3	100.3
2010	2,284.6	2,385.3	104.4
2009	2,379.1	2,252.0	94.7
2008	2,424.8	2,288.2	94.4
2007	2,331.2	2,289.9	98.2
2006	2,251.8	2,284.7	101.5
2005	2,086.0	2,280.6	109.3
Average	2,303.2	2,375.4	103.2

Vtart = Volumen total de aguas residuales tratado expresado en litros por segundo (L/s).

Var = Sumatoria del volumen consumido total reportado para cada sector (doméstico, hotelero, industrial, servicios generales y comercial) expresado en litros por segundo (L/s).

Tarifa del agua

En la Tabla 11 se muestran las diferentes tarifas por metro cúbico en Cozumel a febrero de 2020. La tarifa más elevada corresponde con el sector hotelero y es de 2,366 pesos por metro cúbico, mientras que la tarifa doméstica es la más baja con 7.8 pesos por metro cúbico.

Tabla 11. Tarifa de agua estimada para los diferentes sectores en febrero 2020.

Tarifa	Pesos por metro cúbico
Domestica	7.8
Comercial	32.3
Industrial	825.7
Hotel	2,366.5
Servicios Generales a la Comunidad	74.1

Consumo por usuario

En la Tabla 12 se muestran los volúmenes de agua consumida en litros por día por usuario de 2005 al 2018. De acuerdo con los valores promedio para el periodo considerado, el sector hotelero es el mayor consumidor de litros por usuario (17,225) y el doméstico es el sector que consume menos litros por usuario (402).

Tabla 12. Consumo de agua en litros/usuario/día por año de 2005 a 2019.

año	Domestico		Hotel		Industrial		Servicios generales		Comercial	
	Tuaa	CA _D	Tuaa	CA _H	Tuaa	CA _I	Tuaa	CAD _{SG}	Tuaa	CA _C
2018	16,549	324	60	15,622	23	285	165	2,140	2,317	615
2017	16,780	338	58	20,266	6	468	178	1,996	1,836	651
2016	16,336	352	57	20,310	5	351	176	1,842	1,800	694
2015	15,742	386	57	17,848	5	688	177	1,749	1,790	722
2014	15,547	392	58	15,541	5	582	177	1,726	1,777	719
2013	15,312	387	57	13,026	5	575	180	1,754	1,754	723
2012	14,949	398	57	16,392	5	1,272	175	1,682	1,737	739
2011	14,314	418	57	16,638	5	815	175	1,984	1,712	700
2010	13,893	418	58	16,799	5	2,644	164	1,857	1,690	667
2009	13,178	460	58	16,815	5	1,846	165	1,953	1,662	723
2008	12,488	478	59	19,981	5	978	166	1,887	1,624	780
2007	12,229	470	58	21,016	5	1,117	162	1,759	1,468	776
2006	11,964	469	59	19,593	5	1,112	144	1,944	1,397	754
2005	11,791	463	56	13,237	5	1,573	91	2,849	1,327	782
Promedio	14,518	402	58	17,225	7	978	164	1,956	1,747	710

• CA= Litros de agua consumidos por usuario por día.

• Tuaa = total de usuarios activos al año.

4.3.4 Dinámicas de recarga estimada del acuífero, extracción de agua y consumo

Cozumel se formó por la elevación del lecho marino (Spaw, 1978); por ende, se presentan pocas pendientes y una baja altitud máxima. Se ha formado una microcuenca de forma natural en el centro norte debido a pequeñas elevaciones (4-5 m) y una elevación ligeramente mayor (7.5-11 m) en el extremo norte y a lo largo del perímetro de la costa en el este (Frausto et al., 2019). Debido a la baja elevación, la mayor parte del agua de lluvia puede infiltrarse en el medio poroso o a través de cenotes. En promedio, la Isla tiene 0.01% de gradiente que es consecuencia de la alta transmisividad que produce la alta carstificación (Sánchez y Pinto et al., 2015). Estas características favorecen la canalización, almacenamiento e infiltración de agua de lluvia en la zona centro norte donde se ubica UGA C1, además de ser la ubicación de la mayor lente de agua dulce subterránea. Sin embargo, la alta permeabilidad de los sistemas cársticos también aumenta la vulnerabilidad por la infiltración de contaminantes, además de los problemas de extracción excesiva como intrusiones de agua de mar (Medici et al., 2019, 2020).

Análisis de tendencias

Las estadísticas descriptivas para todos los indicadores considerados se muestran en la Tabla 13. El resultado de la función de autocorrelación (r_i) estimó que ninguno de los indicadores analizados tenía autocorrelación y por lo tanto, era adecuado para la prueba de tendencia de Mann-Kendall.

Tabla 13. Estadísticos descriptivos y los resultados de la función de autocorrelación.

	Unidades	Fecha de la serie	n	Promedio	Max	Min	Desv. Est.	Coficiente de asimetría	Curtosis	r_i
Precipitación mensual	mm	1989 - 2019	372	142	762	0	133	1.79	4.24	0.31 ^a
Temperatura media mensual	°C	1989 - 2019	372	27	33	23	2	0.10	-0.49	0.83 ^a
Evapotranspiración	mm	1989-2019	372	164	380	71	60	0.91	0.99	0.84 ^a
Recarga estimada en UGA	m ³	1990-2019	360	1,482,705	39,971,599	0	4,940,640	4.56	24.59	0.27 ^b
Extracción de agua	m ³	2005-2018	168	345,807	436,806	227,849	37,873	0.32	0.05	0.78 ^c
Comercial	m ³	2005-2018	168	36,989	50,208	21,419	4,150	-0.02	1.36	0.67 ^c
Domestico	m ³	2005-2018	168	177,105	209,459	111,361	13,636	-0.99	2.93	0.42 ^c
Servicios generales	m ³	2005-2018	168	9,497	12,980	5,439	1,358	0.02	0.45	0.50 ^c
Hoteles	m ³	2005-2018	168	30,564	6,636	56,516	7,663	0.16	0.93	0.63 ^c
Industrial	m ³	2005-2018	168	167	655	26	145	1.54	1.87	0.65 ^c

n= número total de registros para cada variable; ^a r_1 (95%) = 0.099 y -0.104. ^b r_1 (95%) = 0.10 y -0.106. ^c r_1 (95%) = 0.145 y -0.157.

Los resultados en Z muestran tendencias estadísticamente crecientes para la temperatura mensual, la evapotranspiración, el agua extraída, los servicios comerciales y generales, mientras que se encontró una tendencia estadísticamente decreciente para la precipitación, la recarga estimada de UGA C1 y la industria. Si bien no se encontró una tendencia significativa para domésticos ($Z = -0.59$) y hoteles ($Z = -0.71$), se encontró una leve tendencia negativa para ambos indicadores en su magnitud de tendencia (-12.87 y -9.31, respectivamente) (Tabla

14).

Tabla 14. Resultados de la prueba de Mann-Kendall y la pendiente de Sen. Las tendencias son significativas con un $\alpha = 0.05$.

	Tendencia	S	VAR (S)	Z	Pendiente de Sen
Precipitación mensual	Decreciente	-6663	5742833	-2.780	-0.120
Temperatura media mensual	Creciente	17697	5742833	7.384	0.007
Evapotranspiración	Creciente	13728	5742833	5.728	0.159
Recarga estimada en UGA	Decreciente	-6704	5205500	-2.938	0
Extracción de agua	Creciente	6519	531505	8.940	498.312
Comercial	Creciente	5276	531505	7.236	41.966
Domestico	Sin tendencia	-432	531505	-0.591	-12.877
Servicios generales	Creciente	4325	531505	5.931	11.969
Hoteles	Sin tendencia	-522	531505	-0.715	-9.313
Industrial	Decreciente	-2505	531505	-3.435	-0.457

$Z_{1-\alpha/2} = 1.96$ y -1.96 .

Estacionalidad

Se observó estacionalidad en los valores de precipitación, donde los valores promedio máximos se identificaron de septiembre a noviembre y los valores más bajos se identificaron a partir de febrero y marzo (Figura 22a). Para la temperatura media y la evapotranspiración, los valores promedio máximos fueron en julio y agosto (Figuras 22b y 22c). En la recarga estimada de UGA C1 se identificó a octubre y noviembre como los meses con mayores valores promedio y valores atípicos. En los primeros tres meses se observó un leve efecto creciente estacional del consumo de agua para servicios comerciales, servicios generales y hoteles.

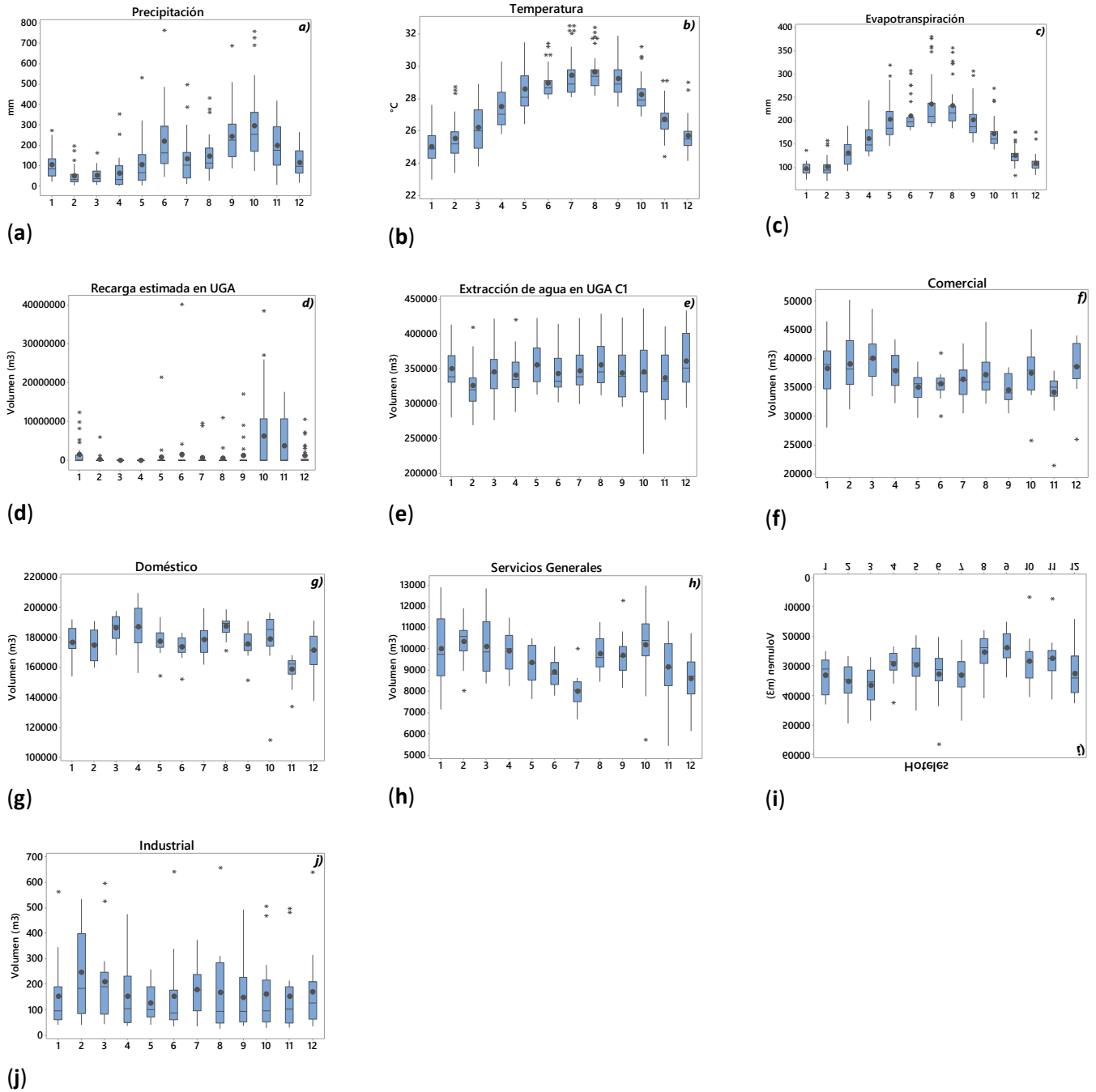


Figura 22. Variaciones mensuales de cada indicador dentro del periodo de tiempo analizado.

Precipitación y temperatura

Se puede observar un aumento de la temperatura media en los últimos 8 años. En julio de 2012 se registró una temperatura media mensual de 30 ° C por primera vez dentro del período

analizado, pero la temperatura ambiental más alta de 32.5 ° C se registró en 2016 y 2017. Desde 2013, los registros más altos se mantienen por encima de los 30 ° C en Cozumel (Figura 23b). Los eventos de precipitación extrema en octubre de 1998, 1999, 2005 y 2011 corresponden temporalmente a los huracanes Mitch, Katrina, Wilma y Rina, respectivamente.

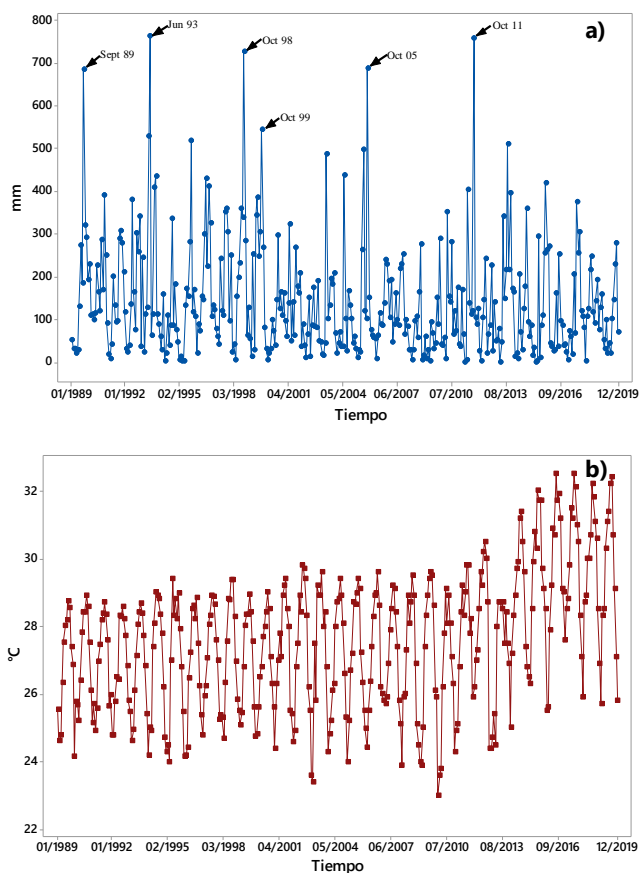


Figura 23. Precipitación mensual(a) y temperatura(b) media registrada en Cozumel de 1989 a 2019.

Evapotranspiración

La evapotranspiración calculada por el método Thornthwaite se basa en valores de temperatura mensual, por lo que se espera un comportamiento similar al de la temperatura media mensual. La evapotranspiración mostró un valor promedio mensual de 164.6 mm (Tabla 13) y una tendencia creciente con una magnitud de pendiente de 0.159. En Cozumel, pocos estudios han reportado valores de evapotranspiración, algunos de los cuales estiman que la evapotranspiración es hasta un 75% de la precipitación anual (Wurl et al., 2003) y

otros hasta $568.73 \text{ Mm}^3 / \text{año}$ cuando se estima por el método Turk (CONAGUA, 2015a). Se puede observar un incremento en los valores a partir de julio de 2012, alcanzando su máximo en julio de 2017, con un valor de 380 mm (Figura 24).

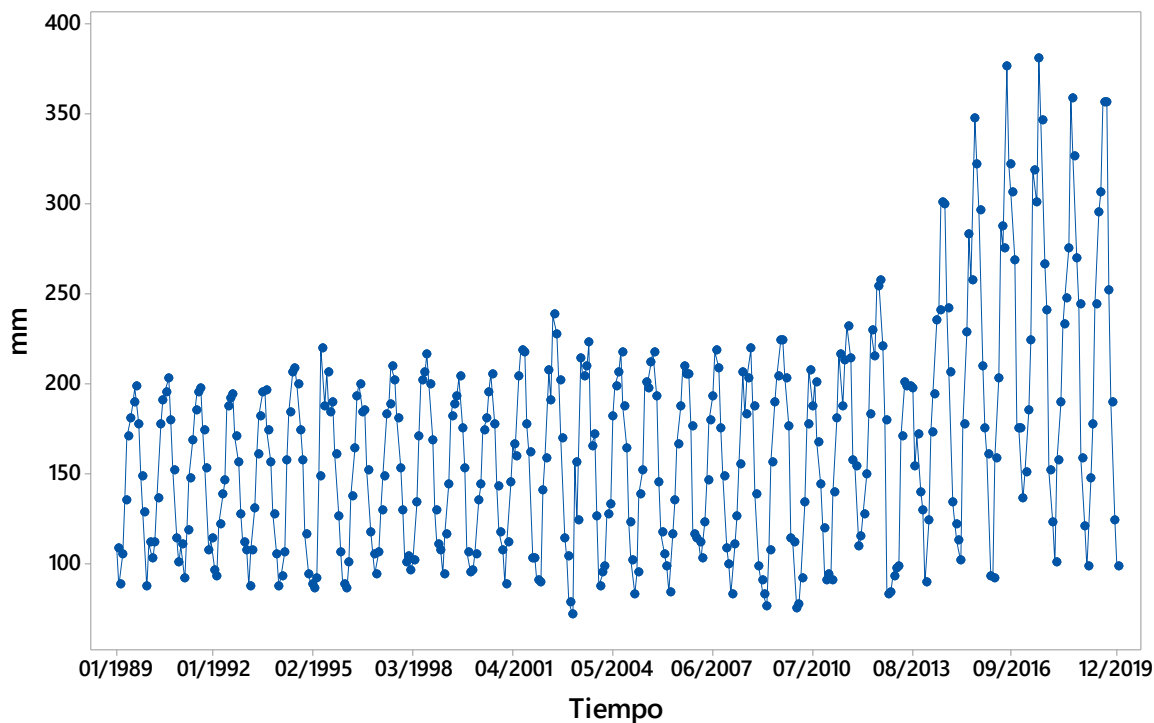


Figura 24. Evapotranspiración estimada de 1989 a 2019.

Recarga estimada

Se espera una tendencia creciente de la frecuencia de huracanes y tormentas tropicales en el Caribe para los próximos años (Taylor et al., 2012). Parece haber una relación entre la recarga y los eventos de precipitación extrema, como se ve en las Figuras 23a y 25. Aunque los huracanes y las tormentas tropicales están asociados con un aumento importante en los volúmenes de precipitación (Vosper et al., 2020), el volumen de lluvia parece depender del comportamiento, características e intensidad del evento climático. Los resultados de la Figura 25 muestran una reducción en la contribución de las tormentas tropicales y huracanes al volumen de recarga estimado en las últimas dos décadas en comparación con los años noventa. En parte porque la lluvia no es el único factor que influye, pues la recarga es el conjunto de varios factores, como: la composición geológica del acuífero, la capacidad de

almacenamiento del suelo y la evapotranspiración.

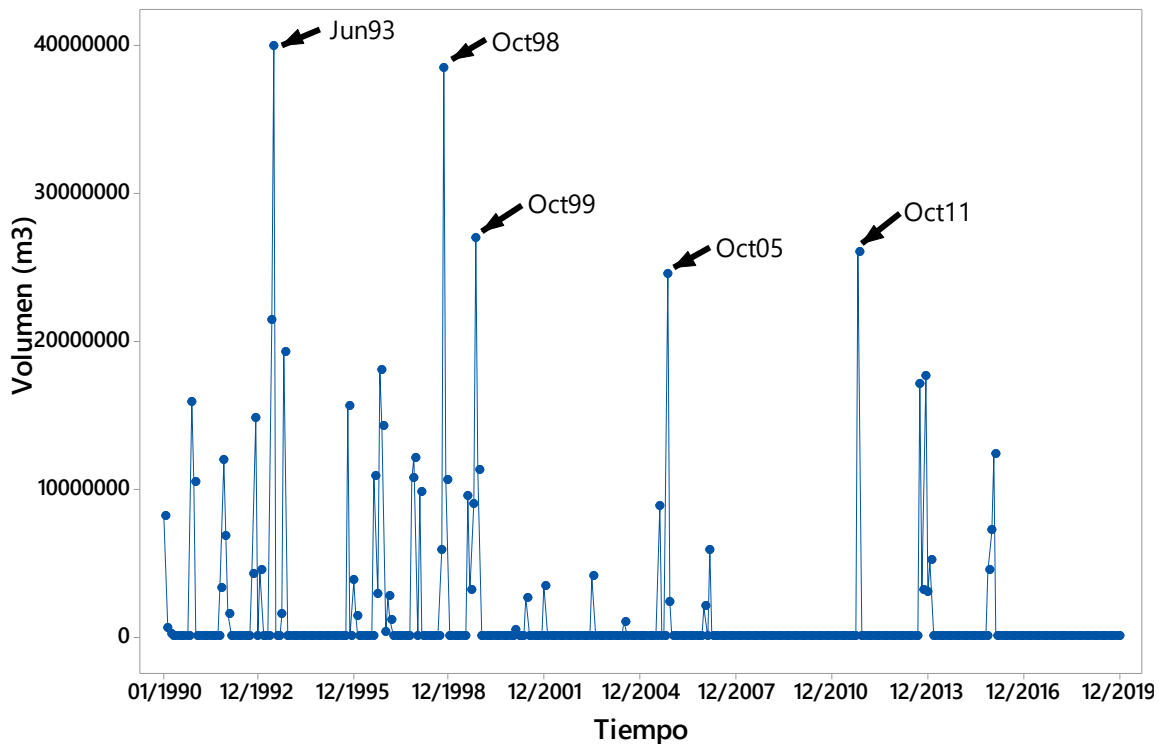


Figura 25. Recarga estimada del acuífero en Cozumel 1990 a 2019.

Extracción de agua de la UGA C1 y el consumo por sector

Los mayores volúmenes de extracción de los pozos están relacionados con el crecimiento de la población y el desarrollo económico de la Isla en los últimos 30 años, pues el crecimiento económico y la urbanización aumentan la demanda de agua (Rodríguez-Huerta et al., 2019b). El volumen de extracción mensual promedio fue de 345,807 m³ (Tabla 13), con el volumen más alto (436,806 m³) registrado en octubre de 2015, seguido de una disminución en los volúmenes de extracción (Figura 26). El número de personas que vivían en la Isla en 2005 fue de 73,193 (Ayuntamiento Presidencia Municipal Cozumel, 2015) mientras que en 2017 fue de 93,477 (SEDETUS, 2019); por lo tanto, la tasa de crecimiento poblacional anual para ese período de tiempo fue de 2.1%.

Se debe prestar especial atención a la diferencia en el volumen total de agua extraída y la suma de agua consumida por todos los sectores de 2005 a 2018. Esta diferencia resultó en un volumen medio mensual de 1,098,000 ± 352,329 m³, lo que representa un promedio del 26%

de el volumen total extraído de los pozos durante el período de tiempo estimado. Parte de este volumen de agua faltante podría atribuirse a fugas debido a deficiencias en la infraestructura de distribución. Las fugas de agua son un problema grave en muchos lugares, algunos de los cuales representan el 37% del volumen total distribuido para la ciudad de México (CEMDA, 2006) o hasta el 15% para algunas partes de los Estados Unidos (Raei et al., 2019).

De acuerdo con información de este estudio, se extrajo un total de 58,095,509 m³ de agua de los pozos de CAPA y se estimó un total de 139,570,864 m³ como recarga para UGA C1 de 2005 a 2018, lo que significa que para ese período el 41.6% del agua recargada se extrajo de UGA C1 por CAPA. Cabe señalar que esto representa solo el volumen extraído de los pozos, por lo que las reducciones de volumen del acuífero por evapotranspiración y manantiales subterráneos deben considerarse en estudios posteriores.

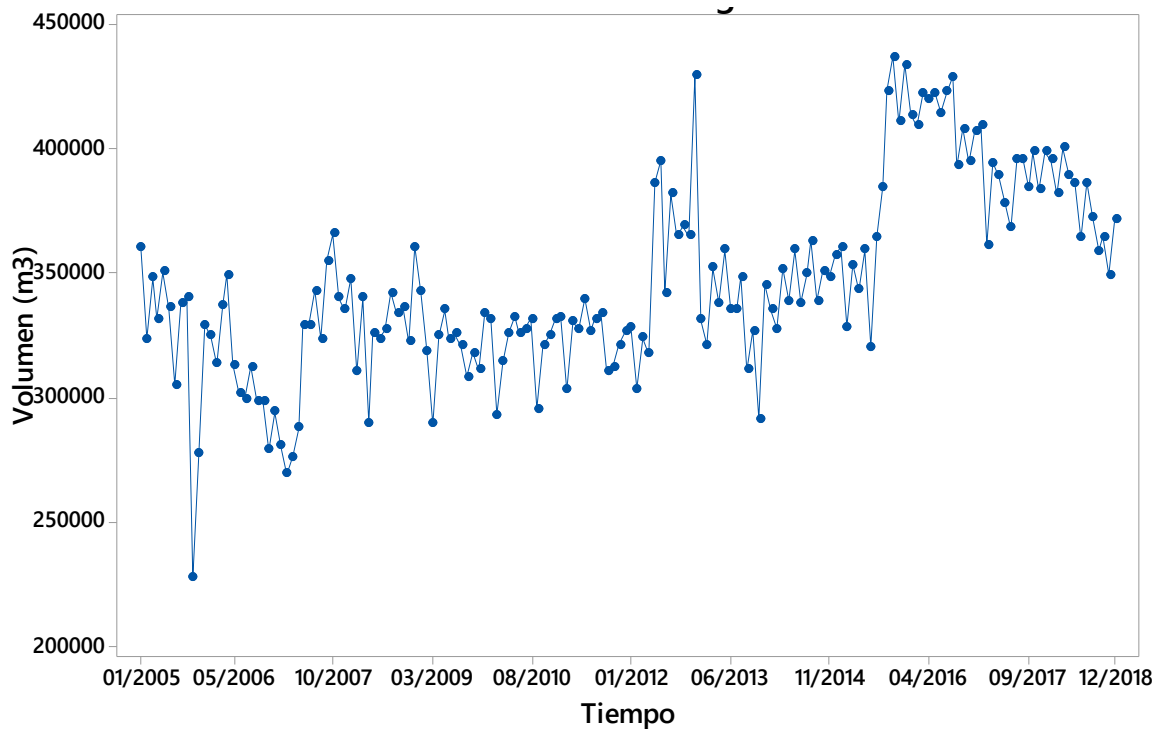


Figura 26. Volumen de extracción mensual por CAPA de 2005-2018.

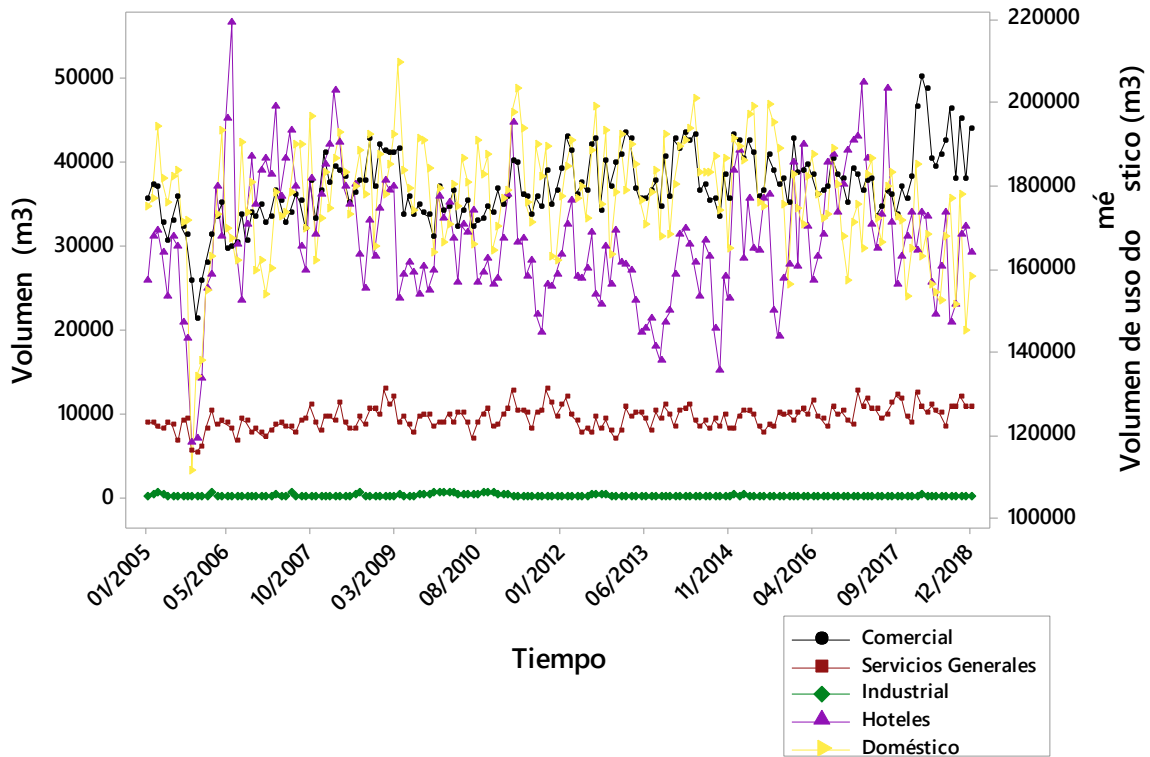


Figura 27. Consumo mensual de agua por los diferentes sectores de 2005-2018. El eje secundario corresponde con el consume doméstico.

4.4 Discusión

4.4.1 Índice de Calidad del Agua

Parámetros de calidad del agua

Desafortunadamente en Cozumel, CAPA ha sufrido restricciones financieras y de personal que han limitado la capacidad de la institución para mantener el área de pozos. El eje dos fue el área más afectada por esta situación, pues su acceso es limitado por el crecimiento excesivo

de vegetación, situación que comparte con los extremos más alejados de los ejes 4 y 5. Además de la necesidad de mantenimiento, la situación económica general de la Isla ha provocado que gente vandalice las instalaciones de área de pozos, reduciendo su capacidad y afectando la gestión por CAPA. El mantenimiento de las instalaciones de extracción de agua es un elemento importante dentro de la gestión del recurso y se recomienda considerarlo como parte de las tarifas de los servicios públicos (WRC, 2011). En México, los presupuestos generales de infraestructura pública son asignados por la federación, aunque los municipios están a cargo de los servicios, lo que genera confusión de atribuciones que se traduce en falta de recursos (Aguilar, 2010). Sin un adecuado plan tarifario, recaudación y distribución por instituciones (CAPA), los recursos económicos seguirán sin llegar suficientemente a las áreas donde se necesitan, reflejándose en un deterioro de la infraestructura y por consiguiente en el servicio. En este sentido, Cozumel (y México) deben avanzar en el fortalecimiento del marco legal e institucional para poder asegurar financiamiento en CAPA con el cual asegurar un adecuado mantenimiento de las instalaciones y suficiente personal; todo esto como parte de una GIRH (Cashman, 2017).

La información sobre temperatura, OD, CE, pH, Cl^- y N-NO_3^- en Cozumel se abordó en el Capítulo 3 (sección 3.4.1). En general, dentro del ICA (Tabla 8) ninguno de los valores promedio de cada parámetro excedió el límite máximo permisible establecido dentro de la NOM-127-SSA1-1994 (NOM).

Los resultados de este estudio corresponden con rangos encontrados en aguas subterráneas de ambientes cársticos con una temperatura promedio de $25.3\text{ }^\circ\text{C}$, OD de $3.2 \pm 0.7\text{ mg/L}$, CE promedio de $1,379.1 \pm 729\text{ }\mu\text{S/cm}$, 0.18 mg/L de nitratos y un pH de 7.1. Aunque existieron pozos particulares en donde se registraron altos niveles para determinados indicadores de calidad del agua, como el pozo 2-1 cuya conductividad fue de $5,407\text{ }\mu\text{S/cm}$ y los pozos 3-1, 3-7, 3-28, 3-38 y 3-39 donde los valores de nitrato fueron superiores a 1 mg/L (4.3 , 3.67 , 2.07 , 13.21 y 11.76 mg/L respectivamente). El hecho de que los pozos con mayor contenido de nitratos se encuentren dentro del eje 3 puede estar relacionado con que la vía donde se ubican los pozos se utiliza como acceso principal a la zona arqueológica de San Gervasio. De ser cierto, la afluencia de personas a la zona arqueológica podría estar generando un

impacto negativo en la calidad del agua, aunque son necesarios más estudios para corroborarlo.

En cloruros se superó el límite máximo de NOM (250 mg/L) en 19 (31%) del total de pozos muestreados; presentándose la mayoría (11) dentro del eje 1. Aunque en el informe de los grupos de agua del Capítulo 3 no parecía haber evidencia de intrusiones salinas, el origen de los cloruros en las muestras de ICA puede deberse al contacto con la interfaz entre el agua dulce y el agua de mar y/o por la disolución de rocas.

Los STD son uno de los parámetros con los cuales evaluar la salinización en aguas subterráneas (CONAGUA, 2018a). En algunos cenotes se ha observado un aumento en los valores de STD debido a la concentración del agua de lluvia por evaporación y la disolución de minerales del suelo; presentando concentraciones uniformes de < 3 g/L cuando no hay influencia marina y de 1,700 a 500 mg/L en lluvias (Alcocer et al., 1998; Schmitter-Soto et al., 2002). En este trabajo se encontraron valores promedio de 893 mg/L de STD y del total de pozos muestreados, solo 19 (31%) presentaron valores por encima de los límites permisibles de la NOM (1,000 mg/L), ubicándose estos principalmente dentro del eje 1.

Con relación a la salinidad, se han reportado valores de 400 a 2,900 mg/L en pozos de la Península de Yucatán (Alcocer et al., 1998). Aunque actualmente no existe un límite permisible para los niveles de salinidad dentro de la NOM; el "Servicio Geológico de los Estados Unidos" (USGS) considera: al agua dulce con salinidades inferiores a 1 g/L y ligeramente salobres con salinidades de 1 a 3 g/L (Swenson & Baldwin, 1965; USGS, 2021). Dentro de este estudio, se encontraron valores promedio de 0.7 ppt para el agua de los pozos muestreados. Solo en 6 pozos (9.8%) se registraron valores superiores a 1 ppt; un pozo por eje, a excepción del eje 1 en donde se presentaron dos (1-3 y 1-11).

La dureza total es la suma de las durezas individuales de los iones magnesio y calcio; las cuales pueden generar corrosión o incrustaciones en tuberías del sistema de distribución de agua en función del nivel de interacción con otras variables como el pH (Sánchez et al., 2016). La dureza se asocia con efectos positivos para la salud, ya que contribuye con las necesidades dietéticas de calcio y magnesio, encontrando correlaciones positivas entre el consumo de agua dura y una menor incidencia de enfermedades cardiovasculares; mientras

que los aspectos negativos asocian a un exceso en el agua con un sabor salobre y con la formación de incrustaciones en las superficies (costras de escamas) (Schutte, 2006).

En la Península de Yucatán se han reportado valores de 122.5 y 2,304.84 mg/L como CaCO_3 . En este estudio, el valor promedio registrado fue de 324 mg/L como CaCO_3 y solo en 2 pozos (3%) se superó el límite máximo permisible (500 mg / L como CaCO_3) establecido en la NOM. En otros informes se han establecido escalas para los valores de dureza total, como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) donde: <60 mg/L corresponde con agua blanda, 60-120 mg/L es moderadamente dura agua, 120-180 mg/L es agua dura y >180 mg/L es agua muy dura (WHO, 1988). Aunque se ha reconocido que el agua con niveles por debajo de 60 mg/L es corrosiva, estos valores no se identificaron en el estudio. Por el contrario, todos los valores registrados superan los 180 mg/L, por lo que de acuerdo con la clasificación de la OMS se consideran aguas muy duras. En Cozumel se conocen los efectos de las altas concentraciones de dureza en el agua, ya que es común ver costras blancas en grifos y en tanques de agua, así como acumulación en tuberías de distribución de agua.

El azufre es un elemento que se encuentra de forma natural en la Península de Yucatán y se incorpora al acuífero mediante la disolución/meteorización de sales sulfatadas de yeso y anhidrita (Pacheco & Cabrera, 1996; Perry et al., 2009; Sánchez et al., 2016). En estudios previos se han reportado concentraciones en el noreste de la Península de Yucatán dentro del rango de 30 a 2,400 mg/L (Alcocer et al., 1998) y 170 a 2,400 mg/L en el sureste de la Península de Yucatán (Schmitter-Soto et al., 2002). En el agua de mar cercana a Cozumel se ha reportado una concentración de 2,800 mg/L y se reportaron concentraciones dentro del rango de 6.43 a 2,367 mg / L dentro de la UGA C1 (Scholz, 2006). En este estudio, el valor promedio registrado fue de 54.1 mg/L y en ningún caso se superó el límite máximo permisible (400 mg/L) establecido en la NOM. El sulfato no es muy tóxico, pero puede causar deshidratación, diarrea y si se ingiere como parte de la dieta, puede alterar los niveles de metahemoglobina y sulfhemoglobina (Sharma & Kumar, 2020). La importancia de estudiar los sulfatos está relacionada con las especies químicas que pueden formarse en las aguas subterráneas; ya que su reducción produce sulfuro acuoso que baja el pH y bajo condiciones adecuadas, puede generar ácido sulfúrico (Stoessell et al., 1993). Bajo condiciones

determinadas, el sulfato se reduce a sulfito, con lo que se genera el característico olor a huevo podrido, mismo que se identificó en algunas muestras de agua especialmente en pozos de los ejes 4 y 5. Esto es importante, ya que se ha comprobado que la presencia de sulfuros generan un efecto de corrosión en las tuberías de distribución de agua (Jiang et al., 2013; Sharma & Kumar, 2020) aumentando así los costos y estrategias de mantenimiento.

Índice de calidad del agua

Del total de pozos muestreados: 49 (80%) mostraron calidad "excelente", 11 (18%) mostraron calidad "buena" y 1 (2%) calidad "mala". En general, se observa que la mayoría de los pozos muestreados tienen agua de buena calidad; sin embargo aquellos con mayor valor de ICA se encuentran cercanos a la carretera transversal. Esto podría deberse a la influencia de los asentamientos urbanos en estas áreas, pues aproximadamente a 600 m al noroeste del pozo 1-2 se puede encontrar un área habitada. En general, la calidad del agua de los pozos muestreados es excelente, sin embargo se debe aclarar que el ICA se estimó con base en los pozos activos de los cuales se extrae el agua. Esto significa que aún se desconoce la calidad del agua en pozos clasificados como "abatidos" o "en reposo", por lo que el ICA es un instrumento importante, aunque no debe ser considerado como el único elemento para un MIRH. Junto con el ICA se debe describir el estado de los pozos en UGA C1 para evaluar la cantidad de pozos con calidad óptima que aún no se explotan. El análisis integral de estos elementos contribuye con la base para generar un modelo sustentable para el acuífero de Cozumel.

4.4.2 Índice de sostenibilidad de ambientes cársticos

Los índices se han utilizado ampliamente para abordar diferentes aspectos de los entornos cársticos, como la vulnerabilidad, la sostenibilidad y la perturbación (Calò & Parise, 2006; Ribeiro & Zorn, 2021; Van Beynen et al., 2012; Van Beynen & Townsend, 2005). En la Península de Yucatán, se han desarrollado índices para estudiar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas (Aguilar-Duarte et al., 2016; Moreno-Gómez et al., 2019) y su calidad (Sánchez et al., 2016). Aunque en estos trabajos se describen métodos para el estudio de problemas importantes en la gestión del agua, estos tienden a centrarse en los indicadores del dominio

ambiental como: precipitación, suelo, nivel del suelo, calidad del agua y no consideran la dinámica de recarga del agua, los patrones de extracción y consumo a lo largo del tiempo. También vale la pena señalar que la mayoría de los índices no especifican el año a partir del cual se estimó la información para cada indicador. La actualización de la información es parte vital de la sostenibilidad, pues asegura que los indicadores coincidan con la realidad reciente, permitiendo generar decisiones con base en la situación actual. Aunque el ISAC original utilizado en este estudio es una excepción al integrar elementos de los tres ejes del desarrollo sostenible, en la mayoría de los otros índices para entornos cársticos: A) la metodología descrita no integra los dominios sociales y económicos, por lo que una aproximación a la sostenibilidad es difícil, B) las dinámicas de indicadores relacionadas con el acuífero se abordan (en caso de ser abordadas) de manera somera. La dinámica de los indicadores de los acuíferos es de extrema importancia en los entornos insulares, pues el agua subterránea puede ser la única fuente de agua dulce viable para las actividades socioeconómicas y el medio ambiente. Por lo tanto, es muy recomendable para los entornos de islas cársticas ampliar los indicadores del acuífero para considerar la dinámica de recarga, o tener un índice específico relacionado con los indicadores del acuífero, junto con informar el año en el que se estimó la información.

Al diseñar el ISAC para este estudio, fue necesario evaluar indicadores aplicables en Cozumel, aquellos que debían modificarse y de ser necesario, proponer nuevos. Con el fin de identificar actualizaciones de información y evitar trabajar con información descontinuada que no reflejaría la situación actual, se optó por incluir el año de publicación de las fuentes de información. La actualización constante de la información y las estrategias persistentes a largo plazo son una parte importante para evaluar la sostenibilidad. Como afirman Van Der Zaag y Savenije (Van Der Zaag & Savenije, 2014a) dentro del MIRH se deben tener en cuenta cuatro dimensiones: recurso hídrico, usuarios, dimensión espacial y dimensión temporal. La AMA considera la sostenibilidad como la eficiencia y permanencia del conjunto de estrategias propuestas (proyectos e iniciativas) para el MIRH en el largo plazo (GWPC, 2015). Este nivel de sostenibilidad corresponde con los impactos positivos y la continuidad de las estrategias en el largo plazo, su evaluación requiere un seguimiento para los años posteriores a su implementación (Loucks & Van Beek, 2017).

La recopilación de información para la aplicación del ISAC fue un desafío, porque requería datos de agencias federales, instituciones gubernamentales, publicaciones académicas, tesis, informes de periódicos, leyes federales y locales, informes de asociaciones e informantes, que a veces eran difíciles de obtener o de acceder. Se identificó la falta de una institución o fuente encargada de la recopilación de información, que de caso contrario, simplificaría la recopilación, facilitaría el monitoreo y las actualizaciones adicionales sobre ISAC. Adicionalmente se reconoció una falta de información para S9, En4 y Ec4.

Como se observa en la Figura 17, los dominios con la mayoría de los objetivos alcanzados se encuentran en los dominios Social y Ambiental. Los primeros 5 indicadores del dominio social dentro del ISAC puntuaron logrados. Esto indica que el territorio en Cozumel está repartido, no existen impedimentos para brindar el servicio de agua potable a la población y empleos para la población (hablantes de lengua nativa) y las instituciones públicas están comprometidas en contribuir activamente con el mejoramiento social y ambiental. Según información de la ONU (PAHO, 2020), para 2015 alrededor del 86% de la población caribeña y el 97% de los países de Centro y Norteamérica tenían acceso al menos a servicios básicos de agua potable, mientras que el 71% y 86% respectivo a servicios de saneamiento. El acceso asegurado a fuentes de agua es importante para los países en desarrollo, pues está vinculado a una mejora en la salud de las poblaciones.

Desafortunadamente, la institución local del agua (CAPA) y el gobierno aún necesitan crear espacios para compartir información del acuífero e integrar usuarios en las decisiones relacionadas con la gestión del recurso. Estos espacios también pueden funcionar como instalaciones educativas para los proveedores de servicios turísticos, aumentando su conocimiento y conciencia del recurso hídrico. Es esencial establecer colaboraciones multisectoriales con diferentes sectores, como universidades y usuarios, que puedan contribuir generando conocimiento, analizando datos y actualizando indicadores.

Los estudios sobre las creencias de los consumidores locales sobre el agua y la sequía son importantes dentro de la caracterización de la población; pues se pueden aprovechar para dar forma a sus percepciones, intenciones y comportamientos relacionados con el consumo sostenible de agua, con lo que se contribuiría a comprender las relaciones que fomenten la conservación del recurso (Kang et al., 2017). Por ello, los estudios de naturaleza antropológica son vitales, como se ha visto en estudios previos donde se han realizado

esfuerzos para incentivar la preservación de los cenotes y su calidad de agua mediante el desarrollo de estrategias basadas en valores culturales (Lopez-Maldonado & Berkes, 2017). La efectividad de estos estudios se ha comprobado al mejorar prácticas relacionadas con el consumo de agua por parte de la agricultura cuando se inculcan valores y se fomenta una actitud de respeto por el uso responsable del agua; como una herramienta más efectiva que el incrementar regulaciones y el costo de los recursos hídricos (Ramírez et al., 2016). Estas y otras estrategias deben considerarse para mejorar el uso responsable del agua por parte de los sectores interesados, los usuarios y la sociedad.

En cuanto a los indicadores ambientales, México cuenta con una amplia gama de normativas y leyes para el medio ambiente (DOF, 2020b; SEMARNAT & CONAGUA, 2018). En Cozumel, el marco legal ha contribuido con la conservación de más del 90% de la superficie con vegetación nativa, rellenos sanitarios cumpliendo con la normativa vigente, un alto grado de cobertura para el manejo de aguas residuales y el cumplimiento de la normativa (INEGI, 2017; Martínez et al., 2018). El marco legal es uno de los tres pilares principales sugeridos por AMA para una gestión integral del agua (AMA, 2018). A diferencia de México, otros países han enfrentado problemas con los marcos legales relacionados con la gestión de recursos, como Barbados en 2008 y la República Cooperativa de Guyana en 2015, donde ambos enfrentaron problemas al intentar integrar la MIRH en sus agendas (Cashman, 2017; GWP, 2014). En Cozumel, las áreas designadas como protegidas no han aumentado desde 2011, las cuales son necesarias para evitar que los complejos turísticos accedan a permisos para la construcción, mismos que impactan áreas boscosas (Quintero, 2020; *Rechazan En Cozumel El Proyecto Lakam-Ha*, 2020). Por otra parte, de acuerdo con las entrevistas realizadas en el Capítulo 4, una reducción en el presupuesto asignado a CAPA podría estar influyendo en su capacidad para monitorear y mantener condiciones óptimas en los pozos de extracción de agua dentro de UGA C1. Para solucionar esta problemática, podría incentivarse la creación de convenios con universidades locales que permitan monitorear la calidad del agua y fomenten la formación de recursos humanos locales mediante un reparto de tareas. También podrían ser la base para generar tecnologías para el tratamiento terciario de aguas residuales, mejorando así las prácticas hacia la sostenibilidad. Aunque cualquier medida debe realizarse con rapidez, pues la evidencia de este trabajo de tesis muestra una reducción significativa en la dinámica de recarga estimada.

En el ámbito económico, las regulaciones aún protegen el área boscosa y promueven el empleo local. Aunque se requieren mejoras para promover el uso de prácticas de ahorro de agua en establecimientos comerciales y hoteles. Los altos volúmenes y las tendencias crecientes en la extracción de agua, así como las pérdidas por fugas en el sistema, también deben abordarse lo antes posible. Las fugas son uno de los mayores problemas para la gestión del agua urbana, porque representan un desperdicio de recursos y esfuerzos económicos (Biswas et al., 2021). Es necesario un estudio adecuado para cuantificar el compromiso con las prácticas para una adecuada gestión del agua de las empresas que prestan servicios turísticos y de todos los hoteles.

La sostenibilidad no es un tema fácil de abordar, especialmente en una isla. El crecimiento económico y social se puede lograr sin impactos negativos en el medio ambiente, pero requiere información sólida para tomar decisiones basadas en evidencia. Es fundamental abordar la falta de información identificada para los indicadores dentro de todos los dominios considerados en este estudio. El seguimiento adecuado y completo de todos los elementos a nivel local se considera el primer paso hacia la sostenibilidad, pues contempla la medición y el monitoreo constante. Aunque la mayor parte de la información se obtuvo de fuentes que se publicaron hace menos de 20 años, no fue fácil acceder a toda la información debido a que se encuentra dispersa. Consideramos vital para la sustentabilidad el establecimiento de un espacio específico o depósito, donde se pueda generar, almacenar y analizar la información.

4.4.3 Indicadores de servicios de distribución

Tratamiento de agua residual

El hecho de que más del 100% del agua que recibe la planta sea tratada puede deberse a la estructura del sistema de drenaje de la Isla. El drenaje de los diferentes sectores de Cozumel converge hacia las lagunas de recolección, que luego se bombea a la planta de tratamiento de agua. Si bien existe un sistema de canalización de aguas pluviales, parte del agua de lluvia ingresa al sistema de drenaje y se suma al volumen de aguas residuales que generan los diferentes sectores.

Tarifa de agua

Junto con la clasificación de los pozos con base en la calidad del agua y la reducción de las horas de servicio de distribución por CAPA, las tarifas diferenciadas y por bloque son parte de las estrategias de gestión del agua en Cozumel. El precio del agua está en el centro de una serie de conflictos, ya que existe una controversia sobre reconocerla como un bien social, comercial o un derecho humano (Aguilar, 2010). Además, las bajas tarifas en el Caribe no han logrado persuadir a los consumidores sobre la escasez y el valor del recurso (Cashman et al., 2010), ya que en países como Barbados, Jamaica y Sta. Lucía el precio por metro cúbico de agua en 2008 se reportó de 2.1, 2 y 2.9 dólares (Meade & Pringle, 2008). Sumado a esto, el modelo financiero de la región, la operación y mantenimiento de la infraestructura hídrica están cubiertos por los ingresos producto de las tarifas (Cashman, 2014) y que comúnmente son limitados debido a un bajo presupuesto. En Cozumel, la tarifa más barata para el servicio de distribución está en el sector doméstico. El sector doméstico tiene una cláusula especial dentro de la ley donde en caso de deuda con CAPA, el servicio se reducirá a “agua suficiente” para satisfacer las necesidades vitales mínimas del usuario, hasta que se cubra el monto de la deuda (Tercera Legislatura Constitucional del Estado de Quintana Roo, 2017). Por otro lado, la tarifa más alta se cobra al sector hotelero con 2,366 pesos por metro cúbico. Otros estudios han demostrado que la estructura tarifaria diferenciada no parece estar relacionada con el consumo de agua, al menos en el sector hotelero (Deyà-Tortella et al., 2016). En general, la tarifa puede ser o no un factor que favorezca el uso responsable del recurso; aunque la sostenibilidad financiera del presupuesto en el sector está fuertemente correlacionados con el acceso a mejores tarifas de agua (Bertoméu-sánchez & Serebrisky, 2018).

Consumo por usuario

Se ha reportado que en los destinos turísticos el consumo de agua por parte de la población es mayor en comparación con localidades con una diferente actividad económica principal. Esta diferencia de consumo varía según la localidad, pero puede ser hasta diez veces mayor (Becken, 2014); sin embargo, el consumo de agua por parte del turismo no se ha investigado con tanto detalle como es el caso de otras actividades económicas, por ejemplo la agricultura

(Gössling et al., 2012). Según los resultados de la Tabla 12, el consumo por usuario doméstico activo (CAD_D) registrados en CAPA ha disminuido un 39% desde 2005, mientras que el número de usuarios activos ha aumentado un 41.7%. Esto significa que aunque hay más usuarios activos, el volumen de agua consumido por cada uno es menor que hace 13 años, pudiendo relacionarse con los recortes de horas de servicio de distribución de agua en la Isla y coincidiendo con el testimonio del entrevistado de iniciativa privada # 1 (Capítulo 3, sección 3.3.3). De acuerdo con información de la Secretaría de Energía (SENER), el consumo de agua per cápita en 2015 fue de 111 litros por día por persona (SENER, 2015), mientras que el la SECTUR estimó un consumo de 92.3 y 189.52 L/habitante/día en 2015 y 2016 respectivamente (SECTUR, 2018). Sin embargo es necesario señalar que este dato parece haber sido estimado al dividir el volumen de agua consumida ($m^3/año$) entre el número de habitantes $* 365 * 1000$. De ser cierto, se estaría errando en la estimación pues en esta ecuación no se considera que en la Isla hay una parte de los habitantes que se abastecen de pozos personales, como se menciona en las entrevistas del Capítulo 3, por lo que los cálculos deben considerar únicamente a los usuarios activos dentro de la red de CAPA.

El principal consumidor de agua por usuario activo en la Isla fue el sector hotelero, aunque en 13 años el número de usuarios solo aumentó un 5%, su consumo de agua por usuario aumentó un 16%. Esto se podría relacionar con el tipo de hoteles en Cozumel, pues en otras localidades se ha reportado que el uso de agua aumenta exponencialmente según el tamaño del hotel (Cole, 2012). En Cozumel, la cantidad de hoteles según la categoría de estrellas es la siguiente: 5 estrellas = 8, 4 estrellas = 11, 3 estrellas = 12, 2 estrellas = 9, 1 estrella = 4 y posadas = 1 (SECTUR, 2013). Esto indica un buen número de grandes hoteles en la Isla y explicaría el alto volumen de consumo por usuario del hotel. El consumo de agua por usuario por día es una herramienta que complementa el consumo volumétrico por sector, pues permite hacer un estimado comparativo sobre el impacto en la demanda diaria de agua que conlleva la creación de un nuevo usuario (nuevo hotel) contra la demanda de un nuevo usuario de otro sector, como el doméstico en Cozumel.

4.4.4 Dinámicas de recarga estimada del acuífero, extracción de agua y consumo

En la Tabla 13 se observaron valores indicadores elevados de curtosis (> 1) y asimetría en la precipitación y recarga estimada. Aunque la mayoría de los meses analizados registraron algunos volúmenes de precipitación, la mayoría de ellos estuvieron cercanos al cero. De acuerdo con el modelo planteado, la recarga estimada no ocurriría con volúmenes de lluvia bajos, lo que resultó en la agrupación de la mayoría de los valores del indicador en cero o cercanos al cero. Esto influyó en la distribución de datos de los indicadores, lo que resultó en valores elevados de curtosis y asimetría.

En Cozumel, la baja elevación del terreno (4-5 m) rodeada de elevaciones ligeramente más altas (7.5-11 m) forman una cuenca natural (Frausto et al., 2019). La infiltración de agua se ve influenciada por el entorno geohidrológico, favoreciendo la presencia de un acuífero dentro de esta cuenca. Se pueden identificar estructuras y características geológicas similares en otras islas del Caribe, como el oeste de Cuba, el centro-norte de Jamaica y el noroeste de Puerto Rico (Doerr and Hoy, 1957), donde la geohidrología permite el mantenimiento de un acuífero.

Los acuíferos de estas islas cársticas del Caribe también están sujetos a una alta vulnerabilidad, pues el suministro de agua y la sequía se consideran problemas importantes para la sostenibilidad (Day, 2010; Len and Parise, 2009). Para abordarlos, es necesario considerar la complejidad y particularidades en cada sistema de aguas subterráneas para su adecuada gestión (Kačaroğlu, 1999). El análisis de la dinámica hidrometeorológica es vital pues las precipitaciones son la principal fuente de recarga de estos acuíferos. Por lo tanto, el análisis de tendencias de la información de los últimos años es una forma valiosa de comprender el comportamiento de los indicadores y su situación actual, como base para el desarrollo y actualización de las estrategias de gestión del agua. El análisis presentado en este estudio podría utilizarse para complementar los estudios de gestión del agua en islas con entornos geohidrológicos similares, donde la información hidrometeorológica puede ser escasa.

La estacionalidad permite identificar patrones anuales dentro de un conjunto de datos de indicadores. La estacionalidad, como se ve en las Figuras 22a y 22b, para la precipitación y la temperatura corresponden con los reportes en la literatura para las estaciones tropicales

tanto lluviosa como seca (SECTUR, 2018). La precipitación promedio mensual fue de 142 mm (Tabla 13) y la precipitación mensual total mostró una tendencia decreciente ($Z = -2.78$). Debido a que la lluvia es la única fuente de agua dulce para los acuíferos cársticos del Caribe, una disminución en su volumen impacta directamente en los volúmenes de recarga. En comparación con años anteriores, se puede identificar una disminución notable de eventos de precipitación intensa desde octubre de 2011 a diciembre de 2019 (Figura 23a). Si bien se espera un aumento de huracanes y tormentas tropicales debido al cambio climático en el Caribe (Vosper et al., 2020), aún no se ha estudiado su efecto sobre los volúmenes de precipitación en Cozumel. La mayoría de los estudios de tendencias hidrometeorológicas disponibles no se centran en Cozumel, sino que están destinados al área de la Península de Yucatán. Estos estudios sugieren una tendencia general decreciente regional en la precipitación (Castro-Borges and Mendoza-Rangel, 2010; De la Barreda et al., 2020; Rodríguez-Huerta et al., 2019b); aunque hay evidencia de un aumento local en algunas partes de la Península de Yucatán, como Ria Lagartos (Estado de Yucatán) y Escárcega (Estado de Campeche) (Neeti et al., 2012). Esta información sugiere que a pesar de la tendencia decreciente regional esperada en la precipitación, puede haber un comportamiento diferente de la precipitación a escala local, lo que enfatiza la importancia de estudios específicos para áreas como Cozumel.

Estudios anteriores indican que las islas pequeñas no tienen las condiciones suficientes para crear su propio clima como lo hacen los continentes, lo que las hace particularmente vulnerables a las condiciones climáticas cambiantes (Gamble, 2004). La variación en los indicadores hidrometeorológicos podría afectar la disponibilidad de agua en las islas del Caribe, debido a la dependencia de la dinámica de infiltración del agua de lluvia para la recarga del acuífero (Falkland, 1993). Para el Caribe, las proyecciones climáticas estiman un aumento de temperatura de 0.7 a 4 ° C y una disminución de las precipitaciones de 10 a 30%, aunque no se espera que estas variaciones sean homogéneas, con diferencias dentro de la región según el tiempo y la ubicación (Cashman, 2014). Por lo tanto, es necesario identificar cambios y actualizar la dinámica de las variables asociadas con la recarga del acuífero, pues son la base para estimar otros indicadores para el manejo sostenible como el volumen del acuífero y las tasas seguras de extracción del acuífero.

Se observó una tendencia creciente en la temperatura mensual (Tabla14): actualmente CONAGUA reporta una temperatura promedio anual de 24.7 ° C para Cozumel (CONAGUA, 2015a), mientras que la temperatura mensual analizada en este trabajo mostró un valor promedio de 27.5 °C; Si bien los resultados de la prueba de la pendiente de Sen muestran un aumento de magnitud mínimo, se puede observar un aumento importante en las temperaturas mensuales a partir de julio a septiembre (2012) y continuar hasta los próximos siete años. Debido a que la pendiente de Sen se estimó para el período mensual de 30 años, este aumento podría no reflejarse en la magnitud. El aumento de la temperatura promedio se ajusta a reportes anteriores en los que se predijo e identificó un aumento de temperatura para la Península de Yucatán y el Caribe (Castro-Borges and Mendoza-Rangel, 2010; De la Barreda et al., 2020; Rodríguez-Huerta et al., 2019a).

En México se espera la modificación de los patrones de precipitación y temperatura debido al cambio climático (De la Barreda et al., 2020), aunque las variaciones climáticas en el Caribe también se pueden asociar con “el niño” y “la niña” (Reguero et al., 2013). Debido a esta variabilidad se espera incertidumbre en los posibles resultados futuros; por lo tanto, se necesita un seguimiento mensual constante y un análisis de la información para realizar estudios detallados del balance hídrico en las islas (Falkland, 1993).

En estudios previos se ha reportado que un aumento en la evapotranspiración y una disminución en la precipitación están asociados con una disminución en la vegetación (Dinpashoh et al., 2011). Se incentiva a realizar más estudios para evaluar las fluctuaciones en los valores de evapotranspiración y su efecto sobre la densidad o variedad de la vegetación en la Isla.

Se han realizado estimaciones previas de los volúmenes de recarga para la Isla, aunque varían debido a la superficie considerada para la infiltración. CONAGUA estimó 208,070,000 m³ de recarga en 2015 y 2020 considerando toda la isla como superficie de infiltración (CONAGUA, 2015a; DOF, 2020a), mientras que otros investigadores estimaron un volumen de 47,500,000 m³ para las áreas de captación y suroeste (Koch et al., 2016). En otro estudio, se estimó un volumen de aproximadamente $140 \cdot 10^6$ m³/año considerando un coeficiente de infiltración de 0.2 de la precipitación total anual (Lesser et al., 1978), mientras que otros autores establecieron que la recarga anual es solo el 6% del volumen de precipitación anual

(Wurl et al., 2003). Si bien todos estos reportes son importantes, representa un desafío comparar la información entre los diferentes estudios, ya que en estos casos no existe una descripción completa del período de precipitación considerado, los criterios considerados para el cálculo de la recarga y la superficie de infiltración. Para este estudio solo se consideró la superficie de UGA C1 y se calculó un volumen de recarga promedio mensual estimado de 1,482,705 m³ desde 1990-2019 (Tabla 13) con una tendencia a la baja ($Z = -2.938$), como se observa en el Tabla 14.

Los resultados de las Figuras 23a y 25 sugieren un sincronismo entre los eventos de precipitación intensa y la recarga estimada alta, ya que la mayoría de los volúmenes de recarga estimados ocurren en octubre y noviembre, coincidiendo con los meses de precipitación más alta (septiembre a noviembre). Como en Cozumel, los eventos fuertes de precipitación comienzan en septiembre, los suelos se saturan con agua que excede los volúmenes de evapotranspiración. Las características geohidrológicas de Cozumel favorecen la ausencia de escorrentías, potenciando la recarga estimada del acuífero en los meses siguientes, la cual disminuye a medida que finaliza la temporada de lluvias. Al homologar los cálculos de recarga estimada para otras islas con entornos geohidrológicos similares, se deben considerar las condiciones locales, los valores de los indicadores regionales y los ajustes de la capacidad de humedad del suelo.

Según la Figura 25 parece haber una reducción en el número de meses en los que se produce la recarga estimada. De un total de 120 meses por década, la suma de meses en los que se ha producido la recarga muestra una disminución: 32 para la década de 1990, 10 para la de 2000 y sólo 9 de 2011 a 2019. La disminución en la recarga estimada podría estar relacionada en parte con una tendencia decreciente en la precipitación y un aumento en la evapotranspiración de los últimos 8-10 años, pues un mayor volumen de evaporación y absorción de agua por las plantas reduce el agua disponible para la recarga del acuífero. Para la Península de Yucatán, el análisis de datos ha mostrado posibles patrones cíclicos plurianuales de ~10 años para los parámetros atmosféricos (Castro-Borges and Mendoza-Rangel, 2010). Se deben realizar más investigaciones sobre escalas de tiempo más grandes y diferentes períodos de tiempo (ejemplo: 10 años) para identificar patrones o ciclos entre la precipitación, la temperatura, otros indicadores y su efecto en la evapotranspiración y recarga para Cozumel.

En la Figura 26 se observó una tendencia creciente de los volúmenes de extracción de agua de los pozos en UGA C1. El aumento en la evapotranspiración y estos resultados podrían indicar un agotamiento en la lente de agua dulce de Cozumel. Una reducción en el nivel del acuífero puede estar relacionada con la sobreexplotación de las aguas subterráneas y con la relación de la evapotranspiración/precipitación, lo que podría resultar en intrusiones de agua salada (Villasuso et al., 2011). Por lo tanto, el manejo del acuífero en Cozumel debe considerar tasas de extracción seguras y actualizadas que se estimen y reajusten para evitar extracciones insostenibles de agua de los pozos, debido a la variación que se observó en este trabajo sobre los indicadores hidrometeorológicos que tienen un efecto sobre la infiltración y los volúmenes disponibles del acuífero (Cashman, 2014; Ng et al., 1992).

La economía de Cozumel se basa en el turismo, por lo que se espera que los patrones de consumo de agua sean influenciados por los visitantes durante las llamadas temporadas turísticas "altas y bajas". Esto se observó en los resultados de estacionalidad para el uso de agua comercial y hotelera (Figuras 22f y 22i respectivamente), como un aumento medio del consumo en temporada alta (verano e invierno) y una disminución en temporada baja (septiembre y octubre) (Segrado, Arroyo, et al., 2017). Por otro lado, debido a la falta de desarrollo industrial, no se identificó una estacionalidad visible en el uso del agua para este sector.

Un aumento general de las actividades turísticas también podría explicar la tendencia creciente en el consumo de agua por parte del sector comercial y la tendencia a la baja del sector industrial. Una tendencia similar se ha reportado en el estado de Quintana Roo, donde un aumento en el consumo en el sector de servicios fue causado por el crecimiento económico del turismo (Rodríguez-Huerta et al., 2019b).

El sector doméstico no muestra una tendencia creciente en el tiempo según el MKt como se esperaría para una población creciente en la Isla. Aunque la población ha informado de reducciones en las horas de servicio de distribución (datos no publicados), la ausencia de una tendencia en el uso doméstico también podría atribuirse a la práctica de cavar pozos domésticos para las necesidades de agua en áreas urbanas o donde los servicios públicos de distribución de agua no están disponibles (Koch et al., 2016). Al hacerlo, los habitantes obtienen acceso a la lente de agua dulce para satisfacer parcial o completamente sus

necesidades de agua (excepto para beber), sustituyendo así los servicios de distribución de agua de CAPA. Cabe señalar que en México es obligatorio obtener un título de concesión aprobado para la explotación de agua del REPDA y CONAGUA antes de la creación de nuevos pozos. Solo los usuarios suscritos a REPDA pueden extraer agua legalmente dentro del territorio mexicano y aunque existe un registro del volumen máximo de extracción permitido por usuario, no existe información sobre el volumen real extraído. Además, no se recomienda el uso de agua directamente de los pozos debido a las implicaciones de mala calidad del agua, a menos que haya pasado por un proceso de purificación adecuado antes de su uso.

En Cozumel existe la creencia popular de que el turismo es un contribuyente importante al consumo de agua dulce, aunque esto no ha sido respaldado por la evidencia analizada aquí. Los resultados de la Figura 27 y la Tabla 13 muestran que el volumen de consumo promedio mensual doméstico de agua distribuida por CAPA es 5.8 veces mayor que el volumen promedio mensual consumido del sector hotelero y 4.8 veces mayor que el volumen promedio mensual de consumo comercial. Esta evidencia posiciona al sector doméstico como el mayor consumidor por volumen de agua extraída de UGA C1, con un volumen promedio mensual de 177,105 m³. Se ha afirmado que los turistas usan considerablemente más agua que los locales (hasta un factor de 10 veces), y este efecto parece exacerbarse en los países en desarrollo (Becken, 2014). Si bien en este estudio no se encontró evidencia de este efecto, se incentivan más investigaciones que consideren las particularidades de la actividad económica y los recursos ambientales de Cozumel. En otras islas como Barbados y Trinidad y Tobago, la demanda de agua por sector doméstico puede representar hasta el 31 y el 40% de la demanda total por sector (Ekwue, 2010). Los estudios adicionales deben considerar no solo los volúmenes de agua distribuidos por CAPA, sino también los volúmenes de agua extraídos directamente del acuífero por usuarios con concesiones REPDA registradas para la Isla, como los hoteles que no reciben servicios de agua por CAPA. El menor consumidor de agua de la isla es el sector industrial, con un volumen medio mensual de 167,67 m³.

4.5 Conclusiones

En este Capítulo se analizó el estado actual de los indicadores de calidad del agua de Cozumel (índice de calidad del agua), medio ambiente (índice de sostenibilidad del carst), servicios de distribución (tratamiento y costo del agua), usos y tradiciones (consumo de agua) del agua para la isla de Cozumel; que contribuyen con un modelo sostenible del acuífero.

Dentro del trabajo de campo en la UGA C1 se identificaron problemas de acceso debido al crecimiento excesivo de vegetación, ausencia de bombas de agua y falta de cableado eléctrico o pozos no funcionales en todos los ejes.

Ninguno de los valores promedio de los 11 parámetros indicadores de calidad del agua dentro del ICA excedió los límites máximos establecidos dentro de la NOM-127-SSA1-1994.

Del número total de pozos muestreados para el ICA: 49 (80%) mostraron calidad "excelente", 11 (18%) mostraron calidad "buena" y 1 (2%) calidad "mala", con un puntaje promedio de 39 para el UGA C1.

Los resultados de ISAC posicionan a Cozumel dentro de la categoría “progresando hacia la sustentabilidad” con relación al estado de las prácticas hacia la sustentabilidad.

El porcentaje anual promedio de aguas residuales tratadas en el período 2005-2018 fue superior al 103%.

Según datos de CAPA de febrero de 2020, el sector hotelero presentó la tarifa más alta (2,366.5 pesos por metro cúbico de agua), seguido del sector industrial (825.7 pesos por metro cúbico de agua); ubicando al sector doméstico como el de menor tarifa por metro cúbico (7.8 pesos) de los sectores considerados.

Dentro del período 2005-2018, el mayor consumo promedio de agua por usuario se observó en el sector hotelero (17,225 L/usuario/día), seguido de los servicios generales (1,956 L/usuario/día); cabe destacar que el sector doméstico presentó un consumo promedio anual de 402 L/día/usuario activo registrado en CAPA.

Los resultados del análisis de tendencias muestran un aumento significativo durante el período de tiempo analizado para los valores mensuales de temperatura ($Z = 7.384$),

evapotranspiración ($Z = 5.728$), volumen de extracción de los pozos ($Z = 8.940$), consumo para uso comercial ($Z = 7.236$) y servicios generales ($Z = 7.236$).

Se observó una tendencia decreciente significativa para el período analizado en los valores de precipitación mensual ($Z = -2.780$), volumen de recarga estimada en el C1 UGA ($Z = -2.938$) y el consumo para uso industrial ($Z = -3.435$).

No se identificó tendencia para los valores medios mensuales de consumo en el sector doméstico ($Z = -0,591$) y hoteles ($Z = -0,715$).

En cuanto al consumo de agua por volumen, el sector doméstico se ubicó como el mayor y el sector industrial como el menor dentro del período 2005 a 2018.

Capítulo 5 – Modelo para el manejo sostenible del acuífero

5.1 Introducción

Los modelos son utilizados como guías con las cuales se pueden abordar o resolver problemas complejos dentro del MIRH (Conservation Ontario, 2010). Para el desarrollo de estos modelos, se toman en cuenta recomendaciones de organizaciones internacionales, fundamentos teóricos, metodos e instrumentos utilizados en el estudio del MIRH; pues lo ideal es que en cada caso se genere un modelo propio el cual refleje y se acomode a las particularidades del cuerpo de agua estudiado. Estos modelos contribuyen con la identificación de problemáticas para la definición de objetivos y estrategias con las cuales resolverlos y avanzar hacia el MIRH.

En Mexico, no se ha desarrollado un modelo para el manejo del recurso, aunque si existen programas nacionales hídricos específicos para cada región hidrológica y que están alineados con políticas públicas a nivel nacional (CONAGUA, 2015b). Desafortunadamente estos planes por lo general son modificados con los cambios de administración, adecuandose a las prioridades del gobierno en turno; además de plantear objetivos ambiguos y sin basarlos en información regional. En Cozumel, aún no existe un modelo para el manejo del acuífero por lo que las estrategias para el manejo del agua son más de carácter correctivo que previsoras. En el presente Capítulo, se integran los resultados de la información abordada en los Capítulos anteriores dentro de un índice integrativo con el cual se generó un modelo para el manejo sostenible del acuífero en Cozumel.

5.2 Objetivo

Integrar la información, obtenida y generada, dentro de un modelo para la gestión sostenible del acuífero Cozumel, fundamentado en la teoría general de sistemas, el concepto de la teoría de sistemas socio-ecológicos y considerando modificaciones a los indicadores sobre el estado actual del acuífero en UGA C1, su entorno ambiental, las actividades económicas dependientes del recurso, servicios de distribución, usos y tradiciones del agua, demografía, aspectos de la salud y jurídicos relacionados con el agua potable.

5.3 Resultados

5.3.1 Índice integrativo

A continuación, se muestra el índice con: indicadores, el rango, los pesos y puntuación (Tabla 15). Posteriormente se analiza el resultado y puntuación de cada indicador. En caso de haber sido analizado en un apartado previo del trabajo de tesis, solamente se describe la puntuación.

Tabla 15. Indicadores, criterios para evaluación, peso, puntuación, años en los cuales se obtuvo la información, sumatoria y fuente para el Índice Integrativo para el Manejo Sostenible de Acuíferos Insulares (IIMSAI).

Dominio	subdominio	Clave	Tema	Indicador	Sistema de calificación	Peso (Wi)	Puntuación (xi)	Periodo o año	xi * Wi	Fuente
Ambiental	Entorno	AEn1	Suelo	Suelos libres de estructuras que impidan la infiltración de agua en el área de captación.	>90%=1, <90% =0	0.024	1	2018	0.024	KSI
		AEn2	Clima	Tendencia temperatura ambiental	Estable=1, Incremento o Decremento =0	0.024	0	1989-2019	0	tesis
		AEn3	Precipitación	Tendencia precipitación	Estable=1, Incremento o Decremento =0	0.024	0	1989-2019	0	tesis
		AEn4	Vegetación	Vegetación nativa en la zona de captación (sin perturbación)	Estable o incremento del 20%=1, Decremento =0	0.024	1	2018	0.024	KSI
		AEn5	Cenotes	Monitoreo del estado de los cenotes y su zona aledaña	>75%=1, <75% =0	0.024	0	2018	0	KSI
		AEn6	Biota asociada	Biodiversidad de especies en el ambiente	Estable o incremento =1, Decremento =0	0.024	0	2018	0	KSI
		AEn7	Evapotranspiración	Tendencia de evapotranspiración	Estable=1, Incremento o Decremento =0	0.024	0	1990-2019	0	Tesis
	Estado del Recurso	AEs1	Cantidad disponible de agua	Cantidad anual de agua dulce renovable disponible per cápita (m ³ /cap/año)	>1700m ³ /cap/año =1, <1700m ³ /cap/año =0	0.028	0	2005-2018	0	CWSI
		AEs2	Calidad del agua disponible	Índice de calidad del Agua en zona de captación	Excelente (< 50) =1; Buena (de 50 a < 100) =0.75; Pobre (de 100 a < 200) =0.5; Muy pobre (200-300) =0.25; No apta para consumo humano (> 300) =0	0.028	1	2019	0.028	ICA
		AEs3	Amenazas	Registro en la zona de captación de: Intrusiones salinas y registros de contaminantes	Cero elementos=1, un elemento =0.5 y dos o más elementos=0	0.028	1	2019	0.028	Tesis
		AEs4	Recarga mensual	Tendencia del volumen recargado en zona de absorción	Estable=1, Incremento o Decremento =0	0.028	0	1990-2019	0	Tesis
		AEs5	Extracción mensual	Volumen de agua que es extraída del ecosistema en la zona de aprovechamiento	Si C/Taq > 0.4, entonces Es =0; C/Taq =0, entonces Es =100	0.028	0	2005-2018	0	CWSI
		AEs6	Monitoreo pozos	Porcentaje de pozos monitoreados y con mantenimiento en el área de extracción.	>90%=1, <90% =0	0.028	0	2019	0	Tesis
Economía	Actividades Socioeconómicas	EAE1	Primarias	Tendencia de consumo de agua proveniente del área de captación por el sector primario (agricultura)	Estable=1, Decremento =0.5, Incremento=0	0.056	1	2020	0.056	Tesis

Social	Servicios de Distribución	E Ae2	Secundarias	Tendencia de consumo de agua proveniente del área de captación por el sector Secundario (industria)	Estable=1, Decremento =0.5, Incremento=0	0.056	0.5	2005-2018	0.028	Tesis
		E Ae3	Terciarias	Tendencia de consumo de agua proveniente del área de captación por el sector terciario (comercial y hoteles)	Estable=1, Decremento =0.5, Incremento=0	0.056	0.5	2005-2018	0.028	Tesis
		ESd1	Red (infraestructura)	Alcance de la red de distribución de agua potable a la población	>95%=1, <95% =0	0.056	1	2015	0.056	KSI
	ESd2	Drenaje (infraestructura)	Alcance red de drenaje	>95%=1, <95% =0	0.056	1	2017	0.056	KSI	
	ESd3	Distribución del recuso	Condición de la infraestructura reflejado en pérdidas en el sistema	Si L>= 25, entonces x _i =0; si L=0, entonces x _i = 100 (L=%pérdidas en el sistema)	0.056	0	2005-2018	0	CWSI	
	Usos y tradiciones	SU t1	Tecnologías	Porcentaje de la población con uso de tecnologías o prácticas para el ahorro de agua	Incremento en 5%=1, de <5% a >0%=0.5, decremento o estático =0, cuando 100%=1	0.022	0	-	0	Tesis
		SU t2	Deidades	Presencia de deidades regionales relacionadas con el recurso hídrico	Presentes=1, Ausentes=0	0.022	1	2019	0.022	Tesis
		SU t3	Celebraciones	Presencia de celebraciones regionales relacionadas con el recurso hídrico	Presentes=1, Ausentes=0	0.022	0	2020	0	Tesis
		SU t4	Volumen mensual de demanda por sector	Tendencia de la demanda del sector doméstico	Estable=1, Incremento o Decremento =0	0.022	0	2005-2018	0	Tesis
		SU t5	Difusión	Espacios para la difusión de información sobre el acuífero e integración de usuarios dentro de las decisiones de manejo	Cero elementos=0, un elemento =0.5 y dos o más elementos=1	0.022	0.5	2018 y 2019	0.011	Tesis
	Marco Jurídico	SMj1	Leyes y normas	Marco Legal	muy pobre (0.00), pobre (0.25), aceptable (0.50), bueno (0.75) and excelente (1.0)	0.022	0.5	2020	0.011	GSII
		SMj2	Programas	Establecimiento y continuidad de programas para fomentar el uso sostenible del agua en la localidad integrando a diferentes sectores de usuarios	Presentes=1, Ausentes=0	0.022	0	2020	0	Tesis
SMj3		Ordenamiento territorial	Presencia de un Plan actualizado sobre el ordenamiento territorial.	Presentes=1, Ausentes=0	0.022	1	2011	0.022	Tesis	

		SMj4	Financiamiento	Financiamientos disponibles para fomentar el uso sostenible del agua en la localidad	Presentes=1, Ausentes=0	0.022	0	2020	0	Tesis
		SMj5	Instituciones	Capacidad institucional	muy pobre (0.00), pobre (0.25), aceptable (0.50), bueno (0.75) and excelente (1.0)	0.022	0.5	2019	0.011	GSII
	Demografía	SDe1	Crecimiento poblacional	Tendencia del crecimiento poblacional	Estable=1, Incremento o Decremento =0	0.037	0	2005-2017	0	SISIS
		SDe2	Urbanización	Área de urbanización	Estable=1, Incremento o Decremento =0	0.037	0	2004-2016	0	KSI
		SDe3	Enfermedades asociadas y mitigación	Número de enfermedades relacionadas con el agua	Sí $w=0$, entonces $x_i=100$; si $w \geq 1$ entonces $x_i=0$. si $w < 1$ y $w > 0$, entonces se aplica la fórmula $x_i=1-w$. w = número de casos notificados de enfermedades transmitidas por el agua / 1,000 personas en Cozumel.	0.037	0.904	2019	0.033	CWSI

KSI= Índice de sustentabilidad del Carst (Van Beynen et al., 2012)

CWSI= Índice canadiense de sostenibilidad del agua (PRI, 2007).

ICA= Índice de calidad del agua (Sánchez et al., 2016)

GSII= Índice de infraestructura de sostenibilidad de aguas subterráneas (Pandey et al., 2011)

SISIS= Índice de sostenibilidad para los pequeños estados insulares en desarrollo (Van Beynen et al., 2018)

A continuación, se describen los resultados de cada indicador

Ambiente

Entorno

AEn1. Suelos libres de estructuras que impidan la infiltración de agua en el área de captación.

En ambientes tropicales se ha establecido que la recolección de árboles dominantes podría causar un gran desequilibrio hidrológico en un ecosistema (Aparecido et al., 2016), por lo que la conservación de una estructura vegetal estable y no perturbada es deseable. De acuerdo con la Figura 19, la UGA C1 es designada como el área de captación. Dentro de esta área existe una carretera con un área aproximada de 0.1 km². Si bien existen pocos asentamientos, estos no representan más del 10% de la superficie total de la UGA C1 (68.85 km²) de acuerdo con lo observado para el 2018 en la Figura 28. Por contar con >90% de suelos libres de estructuras que impidan la infiltración, se le asignó una puntuación de 1.



Figura 28. Fotografía digital del área de captación en 2018.

AEn2. Tendencia temperatura ambiental

Para el periodo 1989-2019 se estimó un incremento en la temperatura mensual ambiental ($Z=7.384$), descrito en el Capítulo 4 apartado 4.3.4. Al haber mostrado un incremento en la temperatura, se le asignó una puntuación de 0.

AEn3. Tendencia precipitación

De acuerdo con información del Capítulo 4 Tabla 14, la tendencia de la precipitación mensual en Cozumel estimada para el periodo 1989-2019 es decreciente ($Z = -2.780$). Al haber mostrado un decremento en la precipitación, se le asignó una puntuación de 0.

AEn4. Vegetación nativa en la zona de captación (sin perturbación)

A diferencia de otras zonas en México, en Cozumel casi el 90% de la superficie está cubierta por vegetación nativa (Martínez et al., 2018). En las Figuras 21a y 21b se corrobora que la mayor parte en el área de captación permanece con vegetación nativa y no se ha modificado, por lo que se le asignó una puntuación de 0.

AEn5. Monitoreo del estado de los cenotes y su zona aledaña

Este indicador es descrito en el ISAC (En 4) en el Capítulo 4 apartado 4.4.1. Por ello, actualmente no se cuenta con un monitoreo de cenotes, su zona aledaña y su estado de conservación, por lo que menos del 75% de los cenotes son monitoreados, lo que corresponde con una puntuación de 0.

AEn6. Biodiversidad de especies en el ambiente

Este indicador es descrito en el ISAC (En 3) en el Capítulo 4 apartado 4.4.1. El reporte de especies amenazadas y posiblemente extintas se considera un decremento en el indicador, por lo que se le asignó una puntuación de 0.

AEn7. Tendencia de evapotranspiración

Este indicador es descrito en el Capítulo 4, encontrando un incremento en el volumen evapotranspirado durante el periodo 1990-2019, por lo que se le asignó una puntuación de 0.

Estado del recurso

AEs1. Cantidad anual de agua dulce renovable disponible per cápita (m^3 /cap/año)

La fórmula original del indicador requiere determinar la cantidad de agua renovable disponible per cápita ($\text{m}^3/\text{cap}/\text{año}$). De ahí, se considera a la escala de Falkenmark en donde $1,700 \text{ m}^3/\text{cap}/\text{año}$ satisfacen los requerimientos de la comunidad, mientras que un volumen menor pueden generar problemas en confiabilidad, desarrollo económico y satisfacción de las necesidades humanas básicas (PRI, 2007). Para el cálculo se toma en cuenta el “safe water yield” o volumen de agua renovable, que se define como el volumen de agua que es menor que la recarga y que asegura disponibilidad para mantener la calidad y cantidad en los ecosistemas (Sophocleous, 2000).

En Cozumel se cuenta con un volumen óptimo de extracción de los pozos que es de 40 lps o $\approx 1,300,000 \text{ m}^3$ anuales y pudiendo alcanzar un millón más, estimados en 1978 (Lesser et al., 1978), mientras que en 2017 se reportó una población de 93,477 habitantes en la Isla (SEDETUS, 2019). Con esta información se calculó un volumen de $24.6 \text{ m}^3/\text{cap}/\text{año}$ de agua renovable disponible para la isla de Cozumel. Este valor debe ser cotejado de acuerdo con la tabla de valores planteada por Falkenmark (Falkenmark et al., 1989): $>1,700$ el desabasto ocurre de manera irregular o local, $1,000-1,700$ el estrés hídrico aparece regularmente, $500-1,700$ la escasez de agua es una limitante para el desarrollo económico, salud humana y bienestar, <500 la disponibilidad de agua es el mayor limitante para la vida. Esto nos indica que el cálculo de el volumen de agua que se puede extraer sin favorecer una reducción del nivel freático (safe wáter yield) debería ser actualizado. Actualmente de 2008 a 2018 se extraen anualmente en promedio $4,149,679.19 \text{ m}^3$ de pozos en la UGA C1; aunque esta cifra está muy alejada de los $2,300,000 \text{ m}^3$ (en 1978) para evitar problemas de sobre extracción. Al presentar un valor $<1700 \text{ m}^3/\text{cap}/\text{año}$ se le asignó una puntuación de 0, además de requerir actualización de información.

AEs2. Índice de calidad del Agua en zona de captación

El ICA se aborda con detalle dentro del Capítulo 4. Al contar con un promedio de 39 en el ICA, se le asignó una puntuación de 1.

AEs3. Presencia de: Intrusiones salinas y registros de contaminantes

Al año 2003 ninguno de los pozos en UGA C1 habían sido cancelados por intrusiones salinas (Wurl et al., 2003), mientras que sólo existen algunos estudios sobre contaminantes, estos se abordaron en el Capítulo 1. Aunque no hay reportes directos sobre alguno de estos elementos dentro de UGA C1, se recomienda una actualización sobre la información de este indicador. Debido a la ausencia de evidencia de intrusiones salinas y de contaminantes en niveles elevados dentro de la UGA C1, a este indicador se le asignó una puntuación de 1.

AEs4. Tendencia del volumen recargado en zona de absorción

En el Capítulo 4 se analizan los datos referentes a este indicador. Al presentar una tendencia decreciente ($Z = -2.938$) se le asignó una puntuación de 0.

AEs5. Volumen de agua que es extraída del ecosistema en la zona de aprovechamiento

Este indicador se enfoca en reflejar los tipos de presión impuesta sobre un ecosistema. Se modificó para tomar en cuenta el volumen estimado de infiltración al acuífero en vez de los caudales superficiales renovables anuales totales. De acuerdo con el Índice Canadiense para la Sostenibilidad del Agua (ICSA), se recomienda que un 60% de las entradas de agua renovables se requieran para mantener un ecosistema saludable y funcional, por lo que un consumo igual o mayor al 40% se le asigna una puntuación de cero.

Si $c/Taq > 0.4$, entonces $Es = 0$; $C/Taq = 0$, entonces $Es = 100$. En caso de que $0.4 > c/Taq > 0$, entonces se utiliza la ecuación 20:

$$X_i = \frac{0.4 - c/Taq}{0.4} \text{ (Ecuación 20)}$$

Donde c = el volumen anual de consumo de agua (extracción) ($m^3/año$) y Taq = flujo total anual renovable (recarga) ($m^3/año$).

De acuerdo con información del Capítulo 4, se extrajo un total de 58,095,509 m^3 de agua de los pozos de CAPA y se estimó un total de 139,570,864 m^3 como recarga para UGA C1 de 2005 a 2018, lo que significa que para ese período el 41.6% del volumen de agua recargado se extrajo de UGA C1 por CAPA. Dado que $C/Taq > 0.4$, se le asignó una puntuación de 0.

AEs6. Porcentaje de pozos monitoreados y con mantenimiento en el área de extracción.

Estos indicadores (En 6 & En 12) son descritos dentro del ISAC en el Capítulo 4 apartado 4.4.1. Los resultados del muestreo en 2019 indican que el 70% de los pozos no presentan dificultades al acceso por falta de mantenimiento y por daños a la infraestructura, por lo que se le asignó una puntuación de 0.

Económica

Actividades socioeconómicas

EAe1. Tendencia de consumo de agua proveniente del área de captación por el sector primario.

De información consultada en el REPGA en junio 2020 para Cozumel, el uso agrícola cuenta con 132 concesiones para la extracción de agua del acuífero. De estas, sólo 31 se encuentran dentro del área de la UGA C1 y su volumen total anual concesionado es de 4,452m³. Si bien no se cuenta con información sobre años pasados, es posible inferir que el volumen extraído por concesiones de uso agrícola en UGA C1 no ha representado ni representa una amenaza al acuífero; básicamente por el bajo impacto de la agricultura en la Isla. Sin embargo, es necesario considerar su permanencia dentro de la UGA C1, pues esta Unidad de Gestión Ambiental se encuentra bajo el propósito de mantenimiento de calidad y cantidad de agua, por lo que no están permitidas las actividades de algún tipo en la zona. Por ello, se consideró como estable, asignándole una puntuación de 1.

EAe2. Tendencia de consumo de agua proveniente del área de captación por el sector Secundario

La tendencia del consumo por el sector Industrial en Cozumel se abordó dentro del Capítulo 4 (Tabla 14). Al igual que el sector primario, el sector secundario no tiene un desarrollo significativo en la Isla y su consumo de agua es mínimo; sin embargo se estimó una tendencia decreciente por lo que se le asignó una puntuación de 0.5.

EAe3. Tendencia de consumo de agua proveniente del área de captación por el sector terciario

Para este indicador, se tomó en cuenta la información del Capítulo 4 (Tabla 14) en donde se estimó un incremento en el consumo por el sector comercial y sin tendencia para el sector hoteles. Al promediar el resultado de ambas calificaciones se obtuvo un valor de $x_i = 0.5$ para este indicador.

Servicios de distribución

ESd1. Alcance de la red de distribución de agua potable a la población

Este indicador es abordado en el ISAC (S3) dentro del Capítulo 4. Dado que el alcance de la red fue $>95\%$, se le asignó una puntuación de 1.

ESd2. Alcance red de drenaje

Este indicador es abordado en el ISAC (En8) dentro del Capítulo 4 apartado 4.4.1. Dado que el alcance de la red fue $>95\%$, se le asignó una puntuación de 1.

ESd3. Condición de la infraestructura reflejado en pérdidas en el sistema

Este indicador es abordado en el ISAC (Ec6) dentro del Capítulo 4. Para estimar el valor se utilizó la ecuación 21, modificada de PRI (PRI, 2007) en la que se considera una escala de 0-1 siempre y cuando el valor de $L = <25$:

$$x_i = -1 * \left(\frac{L}{25} - 1 \right) \quad (\text{Ecuación 21})$$

Donde x_i es la puntuación para el indicador y L es el porcentaje de pérdidas en el sistema. Dado que en Cozumel el valor de $L \geq 25$, entonces se asignó una puntuación de 0.

Social

Usos y tradiciones

SUt1. Porcentaje de la población con uso de tecnologías o prácticas para el ahorro de agua

Este indicador es abordado en el ISAC (Ec5) dentro del Capítulo 4. Dado que se desconoce la información para el indicador, se le asignó una puntuación de 0.

SUt2. Presencia de deidades regionales relacionadas con el recurso hídrico

Aún cuando las tradiciones religiosas no son la principal fuerza detrás de las políticas ambientales nacionales, queda claro que tienen un gran potencial para influenciar nuevas actitudes hacia la naturaleza (Chuvienco, 2012). Dentro de la región, se reconoce la deidad Ixchel con la luna, fertilidad, nacimiento, cenotes y agua subterránea (Iwaniszewski, 2016; Patel, 2005). No se pudo encontrar información sobre el grado de apreciación o conexión de la población local con tradiciones o costumbres relacionadas con el agua en la Isla. El desarrollo de investigaciones que puedan informar sobre este aspecto es importante, pues de existir una asociación de una deidad con el recurso, podría tomarse como la base para generar estrategias de reapropiamiento y revaloración del recurso agua. Por ejemplo, el desarrollo de una celebración hacia la deidad Ixchel, como una estrategia para incentivar la conciencia sobre el uso y cuidado del agua. Es importante mencionar que se recomienda complementar al aprovechamiento de deidades con las tecnologías utilizadas por poblaciones indígenas regionales, como una manera de incentivar la reconexión de la población con el recurso hídrico. En el caso de la Península de Yucatán, existe registro del uso de estructuras excavadas para el almacenamiento de agua de lluvia a modo de cisternas, conocidos como Chultun (Back, 1995; Faust, 2001; Matheny, 1971). Aunque actualmente no son utilizadas comúnmente, se deben considerar como una posible tecnología u objeto de investigación para estudios posteriores. Dado que se identificaron deidades regionales relacionadas con el recurso, se le asignó una puntuación de 1.

SUt3. Presencia de celebraciones regionales relacionadas con el recurso hídrico

Una de las maneras de difusión de información e involucramiento de la población y tomadores de decisiones es la promoción en eventos, pues le dan al público en general “la oportunidad de al menos tropezar con un problema”, “un acontecimiento para toda la familia”

y una forma de llegar a quienes no estaban interesados inicialmente (Jonsson, 2005). En la Isla se realizan aproximadamente 19 distintos festivales y eventos turísticos anualmente, siendo el Carnaval y las fiestas del cedral de los más importantes (SECTUR, 2013). No hay evidencia sobre alguno de ellos en la que se tenga una conexión directa con el agua dulce. El generar una celebración relacionada con el agua dulce, podría ser la base para introducir en los habitantes la conciencia sobre lo limitado del recurso en las islas y un incentivo para colaborar con su correcto manejo. Dado que no se identificaron celebraciones regionales relacionadas con el recurso, se le asignó una puntuación de 0.

SU4. Tendencia de la demanda del sector doméstico

Este indicador es abordado en el Capítulo 4 (Tabla 14). Dado que no se identificó una tendencia, se le asignó una puntuación de 1.

SU5. Espacios para la difusión de información sobre el acuífero e integración de usuarios dentro de las decisiones de manejo

Este indicador es abordado en el ISAC (S8) del Capítulo 4. Dado que no se identificaron espacios, se le asignó una puntuación de 0.

Marco Jurídico

SMj1. Marco Legal

El marco legal y su importancia dentro del MIRH se abordaron en el Capítulo 1 y 2. Por estas razones, se considera aceptable, con una puntuación de 0.5 al marco legal.

SMj2. Establecimiento y continuidad de programas para fomentar el uso sostenible del agua en la localidad integrando diferentes sectores de usuarios

Este indicador se abordó en el Capítulo 1. Por ello, se considera una puntuación de 0 para el indicador.

SMj3. Presencia de un Plan actualizado sobre el ordenamiento territorial

Este indicador es abordado en el ISAC (En2) del Capítulo 4. Si bien no se ha actualizado desde 2011, el POEL cubre la mayor parte del territorio insular. Por ello, se considera una puntuación de 1 para el indicador.

SMj4. Financiamientos disponibles para fomentar el uso sostenible del agua en la localidad

Uno de los elementos más importantes para la continuidad de las estrategias es la sostenibilidad en el largo plazo. Generalmente, la falta de financiamiento es una de las razones más importantes por las cuales no existe continuidad en el MIHR, pues el recurso para mantenerlas puede recortarse o ser asignado a temas “de moda” (Biswas, 2008b). Actualmente no hay financiamiento nacional o internacional para el manejo sostenible en la Isla, pues no existe un plan para manejo integral concreto el cual financiar. Dada la ausencia de financiamiento, se le asignó una puntuación de 0.

SMj5. Capacidad institucional

Este indicador es abordado dentro del Capítulo 1 (apartado 1.2) & 2 (apartado 2.3). Si bien se cuenta con capacidad y figuras institucionales, aún falta trabajo e integración de ellas para un MIRH en Cozumel. Por ello se le asignó la puntuación de 0.5.

Demografía

SDe1. Tendencia de crecimiento poblacional

Este indicador es abordado dentro del Capítulo 4 (apartado 4.3.4). Dado el incremento de 2.1%. de 2005 a 2017, se le asignó una puntuación de 0.

SDe2. Área de urbanización

Este indicador es abordado en el ISAC (Ec2) del Capítulo 4 apartado 4.4.1. Dado el incremento observado, se le asignó una puntuación de 0.

SDe3. Número de enfermedades relacionadas con el agua

Este indicador evalúa los impactos en la salud al considerar a las enfermedades transmitidas por el agua, como la giardiasis, la campilobacteriosis, la shigelosis y las enfermedades causadas por *Escherichia coli* (PRI, 2007).

La Organización Mundial de la Salud y la ONU establecen la importancia de concientizar sobre el abastecimiento de agua limpia y sanitización en una gran porción del mundo para el control de enfermedades relacionadas con el agua como la diarrea (UN Water, 2017; White, 1998). Por ejemplo en Cozumel, con respecto a las enfermedades diarreicas agudas se reportaron 3,308 y 2,889 casos para 2015 y 2016 respectivamente (Chagoy et al., 2017). Estas cifras corresponden con los datos de pacientes diagnosticados dentro del sector salud, por lo que no representan al total de casos, pues hay un número de ellos que no fueron diagnosticados y atendidos por el sector salud, quedando fuera del registro.

También se debe considerar la incidencia de enfermedades que utilizan a organismos que dependen del agua dulce como vectores, como los mosquitos. Existen reportes (Van der Berg & Takken, 2007) sobre el manejo de agua residual como una estrategia para el manejo integral de vectores (mosquitos). En Cozumel la incidencia acumulada de casos de Zika en 2016 fue de 15 casos en la semanas 1-37, siendo 8 de ellos de mujeres embarazadas; de dengue 8 casos y 0 de Chikungunya (Chagoy et al., 2017).

Finalmente, la información más actualizada es provista en los boletines epidemiológicos estatales, con los cuales se elaboró la Tabla 16 que corresponde a las enfermedades asociadas con agua para los años 2018 y 2019 (SSEQRoo, 2019). Para este indicador se tomó en cuenta la información representada en la Tabla 16, aunque se incentiva en estudios posteriores a incluir enfermedades transmitidas por vectores (como mosquitos), enfermedades asociadas con mala calidad de agua y/o contaminantes.

Tabla 16. Enfermedades asociadas al agua registradas en Cozumel del 2018 y 2019.

	2019				2018		
	Semana 52	Acumulado		Total	Acumulado		Total
		Femenino	Masculino		Femenino	Masculino	
Giardiasis	0	5	0	5	6	3	9
Campylobacteriosis	0	0	0	0	0	0	0
Shigelosis	0	0	0	0	0	0	0
Colera	0	0	0	0	0	0	0

xi se obtuvo al modificar la ecuación planteada por el PRI (PRI, 2007), donde w es el número de enfermedades asociadas al agua reportadas/ 1,000 personas. Sí w = 0, entonces $x_i = 100$; sí w ≥ 1 , entonces $x_i = 0$. Si w es menor que 1, pero mayor que cero entonces se aplica la ecuación 22:

$$x_i = 1 - w \quad (\text{Ecuación 22})$$

Considerando una población de 93,477 habitantes en 2018 y un total de 9 enfermedades asociadas con el agua en ese mismo año, se obtiene un w= 0.096 y una $x_i = 0.9$. Por ello la puntuación en este indicador fue de 0.9.

Calificación del Índice

Puntuación total del Índice Integrativo para el Manejo Sostenible de Acuíferos Insulares es de: 0.43 de 1; por lo que se clasifica dentro de “Insostenible”.

5.3.2 Modelo para el manejo sostenible del acuífero

A continuación, se presenta el Modelo Sostenible para el Acuífero de Cozumel (MSAC) (Figura 29). Dentro del modelo se integra la información de indicadores adecuados a Cozumel sobre el entorno ambiental, las actividades económicas dependientes del recurso, servicios de distribución, usos y tradiciones del agua, demografía, aspectos de la salud y jurídicos relacionados con el agua potable, con fundamento de la TGS y el concepto de la teoría de SSE. El modelo plantea que los objetivos para el MIRH en Cozumel se deben basar en información obtenida del análisis de indicadores relacionados con el acuífero. La

descripción para el uso del modelo y los elementos que lo integran se encuentra dentro del Capítulo 1.

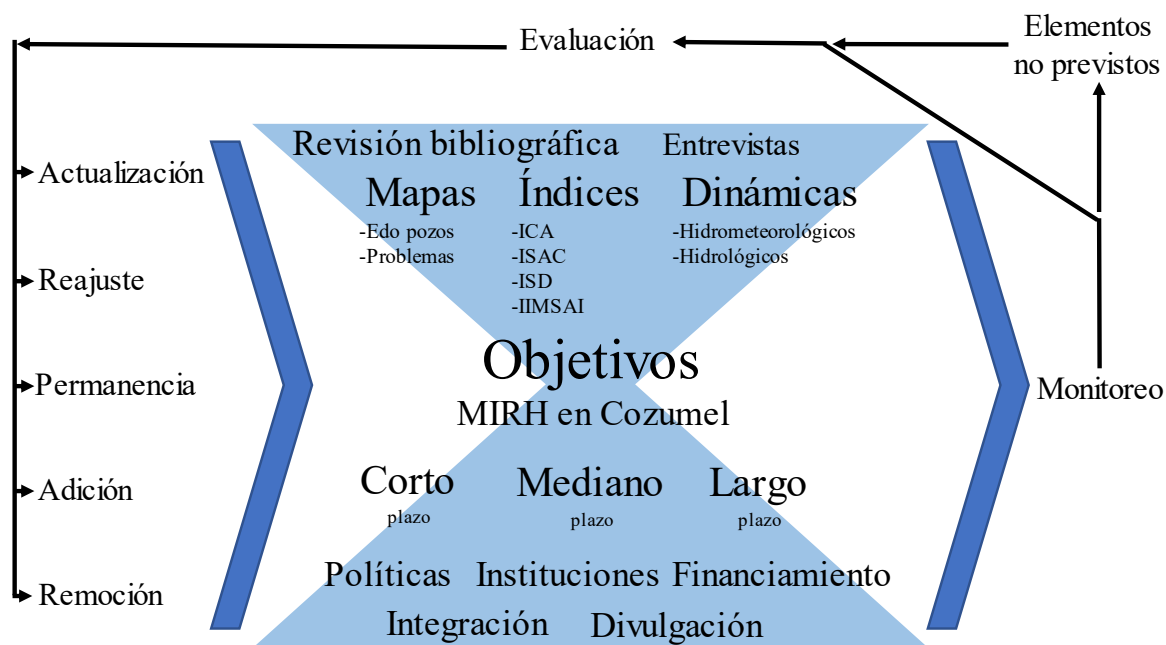


Figura 29. Modelo sostenible para el Acuífero de Cozumel (elaboración propia).

5.3.3 Propuesta manejo integral

Con relación a los puntos señalados dentro del apartado 1.8.4 en el Capítulo 1, los elementos se abordaron dentro de los Capítulos señalados a continuación: Capítulo 4, apartado 4.4.1

- 1) Capítulo 4 (apartado 4.4.4) y 5 (indicador EAe1)
- 2) Capítulo 3 apartado 3.4.4.
- 3) Capítulo 4
- 4) Capítulo 4

Se presentan los objetivos y estrategias en el corto plazo para los elementos del apartado 6) utilizando el MSAC en:

- 6a) Propuesta para el uso eficiente del recurso hídrico en Cozumel (Tabla 17).
- 6b) Plan de monitoreo de la calidad del acuífero en UGA C1, Cozumel (puntos de muestreo, periodicidad y parámetros) (Tabla 18).
- 6c) Identificación y estrategias para la mitigación de elementos con incidencia negativa sobre el acuífero (Tabla 19).

6d) Estrategias para reducir la falta de información sobre temas relacionados a la gestión sostenible en Cozumel (Tabla 20).

Tabla 17. Objetivos y estrategias para para atender el punto 6a de la propuesta de manejo integral.

Objetivos
Evaluación de información disponible y los elementos con los que se relaciona
<p>Dentro de la revisión bibliográfica se encontró que hace falta caracterizar los siguientes elementos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Consumo real por parte de usuarios inscritos al REPDA, en específico aquellos con actividades extractivas dentro de UGA C1. • Estimación de Volúmenes de Extracción Diario Sostenibles (VEDS) para los pozos en UGA C1. • Diagnóstico sobre el estado actual de la infraestructura de distribución de agua. • Percepción de la población y hoteles (los mayores consumidores de agua por volumen y por usuario respectivamente) sobre el recurso. • Divulgación de la información.
Objetivo General: Generar una propuesta para el uso eficiente del recurso hídrico en Cozumel.
<p>Objetivos en el corto plazo</p> <ul style="list-style-type: none"> • Determinar el consumo real por parte de usuarios inscritos al REPDA, en específico aquellos con actividades extractivas dentro de UGA C1. • Estimación de VEDS para los pozos en UGA C1. • Determinar el estado actual de la infraestructura de distribución de agua. • Conocer la percepción de la población y hoteles sobre el recurso hídrico. • Generar espacios para la divulgación de información abordada en los objetivos previos.
<p>Objetivos en el mediano Plazo</p> <ul style="list-style-type: none"> • Integración de los usuarios dentro de las decisiones de manejo. • Colaboración entre instituciones para el manejo del recurso.
<p>Objetivos en el largo Plazo</p> <ul style="list-style-type: none"> • Generar una propuesta para el uso eficiente del recurso hídrico en Cozumel.

Estrategias en el corto plazo	
Objetivo	Determinar el consumo real por parte de usuarios inscritos al REPDA, en específico aquellos con actividades extractivas dentro de UGA C1
Políticas	Consultar los derechos y obligaciones legales, así como el número y ubicación de usuarios inscritos al REPDA
Instituciones	Consultar los consumos históricos anuales de los pasados 10 años (mínimo) de usuarios inscritos al REPDA.
Financiamiento	Explorar financiamiento público y privado para el desarrollo de los objetivos.
Integración	Contemplar la integración de universidades, organizaciones no gubernamentales y usuarios como parte del proyecto.
Divulgación	Crear una plataforma en línea y sesiones informativas en espacios públicos para la divulgación de avances.
Objetivo	Estimación de VEDS para los pozos en UGA C1
Políticas	No aplica.
Instituciones	Consultar los permisos para la toma de muestras.
Financiamiento	Explorar financiamiento público y privado para el desarrollo de los objetivos.
Integración	Contemplar la integración de universidades, organizaciones no gubernamentales y usuarios como parte del proyecto.
Divulgación	Crear una plataforma en línea y sesiones informativas en espacios públicos para la divulgación de avances.
Objetivo	Determinar el estado actual de la infraestructura de distribución de agua
Políticas	Revisar el marco jurídico con relación al mantenimiento, nuevas obras y asignación de presupuestos.
Instituciones	Consultar reportes sobre mantenimiento de la infraestructura en los pasados 10 años.
Financiamiento	Explorar financiamiento público y privado para el desarrollo de los objetivos.
Integración	Contemplar la integración de universidades, organizaciones no gubernamentales y usuarios como parte del proyecto.
Divulgación	Crear una plataforma en línea y sesiones informativas en espacios públicos para la divulgación de avances.
Objetivo	Conocer la percepción de la población y hoteles sobre el recurso hídrico
Políticas	Revisar limitaciones legales de instrumentos metodológicos para conocer la percepción.
Instituciones	Solicitar información a universidades u organismos públicos sobre el tema.
Financiamiento	Explorar financiamiento público y privado para el desarrollo de los objetivos.
Integración	Contemplar la integración de universidades, organizaciones no gubernamentales y usuarios como parte del proyecto.
Divulgación	Crear una plataforma en línea y sesiones informativas en espacios públicos para la divulgación de avances.

Objetivo	Generar espacios para la divulgación de información abordada en los objetivos previos
Políticas	Revisar limitaciones legales y políticas para la divulgación de información resultante.
Instituciones	Definir el grado de participación de instituciones involucradas para la divulgación.
Financiamiento	Explorar financiamiento público y privado para el desarrollo de los objetivos.
Integración	Evaluar espacios y disponibilidad.
Divulgación	Crear una plataforma en línea y sesiones informativas en espacios públicos para la divulgación de avances.

Tabla 18. Objetivos y estrategias para para atender el punto 6b de la propuesta de manejo integral.

Objetivos	
Plan de monitoreo de la calidad del acuífero en UGA C1, Cozumel (puntos de muestreo, periodicidad y parámetros)	
Dentro de la revisión bibliográfica se encontró que hace falta caracterizar los siguientes elementos: <ul style="list-style-type: none"> • Abordada en el trabajo de tesis dentro del ICA (Capítulo 4). 	
Objetivos General: Implementar un plan de monitoreo de la calidad del acuífero en UGA C1, considerando puntos de muestreo, periodicidad y parámetros en Cozumel.	
Objetivos en el corto plazo <ul style="list-style-type: none"> • Definir los elementos para el plan de monitoreo en UGA C1. 	
Objetivos en el mediano Plazo <ul style="list-style-type: none"> • Integración de los usuarios dentro del monitoreo. • Colaboración entre instituciones para el monitoreo del recurso. 	
Objetivos en el largo Plazo <ul style="list-style-type: none"> • Implementar un plan de monitoreo de la calidad del acuífero en UGA C1, considerando puntos de muestreo, periodicidad y parámetros en Cozumel. 	
Estrategias en el corto plazo	
Objetivo	Definir los elementos para el plan de monitoreo en UGA C1
Políticas	Ya se realizó en el ICA
Instituciones	Ya se realizó en el ICA
Financiamiento	Explorar financiamiento público y privado para el desarrollo del monitoreo
Integración	Contemplar la integración de universidades, organizaciones no gubernamentales y usuarios dentro de los muestreos
Divulgación	Crear una plataforma en línea y sesiones informativas en espacios públicos para la divulgación de avances.

Tabla 19. Objetivos y estrategias para para atender el punto 6c de la propuesta de manejo integral.

Objetivos	
Identificación y estrategias para la mitigación de elementos con incidencia negativa sobre el acuífero	
Dentro de la revisión bibliográfica se encontró que hace falta caracterizar los siguientes elementos: <ul style="list-style-type: none"> • Se reconoció una falta de conocimiento sobre el grado de impacto de los diferentes elementos con incidencia negativa sobre el acuífero. 	
Objetivos General: Identificar y generar estrategias para la mitigación de elementos con incidencia negativa sobre el acuífero.	
Objetivos en el corto plazo <ul style="list-style-type: none"> • Definir el grado de impacto de los diferentes elementos con incidencia negativa sobre el acuífero. 	
Objetivos en el mediano Plazo <ul style="list-style-type: none"> • Divulgación de información sobre el impacto de los diferentes elementos con incidencia negativa sobre el acuífero. • Concientizar a los usuarios sobre el impacto de los diferentes elementos con incidencia negativa sobre el acuífero. 	
Objetivos en el largo Plazo <ul style="list-style-type: none"> • Implementar estrategias integrales para la mitigación de elementos con incidencia negativa sobre el acuífero, con base en su grado de impacto. 	
Estrategias en el corto plazo	
Objetivo	Definir el grado de impacto de los diferentes elementos con incidencia negativa sobre el acuífero
Políticas	Se revisaron los límites máximos permisibles y marco legal en el trabajo de tesis.
Instituciones	Se revisaron las obligaciones de CAPA en el trabajo de tesis.
Financiamiento	Explorar financiamiento público y privado para el desarrollo del proyecto.
Integración	Contemplar la integración de universidades, organizaciones no gubernamentales y usuarios dentro del proyecto.
Divulgación	Crear una plataforma en línea y sesiones informativas en espacios públicos para la divulgación de avances.

Tabla 20. Objetivos y estrategias para para atender el punto 6d de la propuesta de manejo integral.

Objetivos	
Estrategias para reducir la falta de información sobre temas relacionados a la gestión sostenible en Cozumel	
Dentro de la revisión bibliográfica se encontró que hace falta caracterizar los siguientes elementos: <ul style="list-style-type: none"> • Se identificó la falta de un plan para la generación de información sobre temas relacionados a la gestión sostenible en Cozumel. 	
Objetivos General: Implementar un plan para reducir la falta de información sobre temas relacionados a la gestión sostenible en Cozumel.	
Objetivos en el corto plazo <ul style="list-style-type: none"> • Establecer los elementos dentro de un plan para generar información sobre temas relacionados con la gestión sostenible en Cozumel. 	
Objetivos en el mediano Plazo <ul style="list-style-type: none"> • Caracterizar a los elementos dentro de un plan para la generación de información sobre temas relacionados a la gestión sostenible en Cozumel. • Analizar a los elementos dentro de un plan para la generación de información sobre temas relacionados a la gestión sostenible en Cozumel. 	
Objetivos en el largo Plazo <ul style="list-style-type: none"> • Implementar un plan para generar información sobre temas relacionados a la gestión sostenible en Cozumel. 	
Estrategias en el corto plazo	
	Establecer los elementos dentro de un plan para generar información sobre temas relacionados con la gestión sostenible en Cozumel
Políticas	Revisar el marco jurídico de elementos relacionados con la gestión sostenible en Cozumel.
Instituciones	Definir a las instituciones con base en elementos relacionados con la gestión sostenible en Cozumel.
Financiamiento	Explorar financiamiento público y privado para el desarrollo del proyecto.
Integración	Contemplar la integración de universidades, organizaciones no gubernamentales y usuarios dentro del proyecto.
Divulgación	Crear una plataforma en línea y sesiones informativas en espacios públicos para la divulgación de avances.

5.4 Discusión

5.4.1 Índice Integrativo

Se evaluaron métodos de integración como los cuadros de integración descritos por Liehr et al. (Liehr et al., 2017); sin embargo se optó por el desarrollo de un índice compuesto, similar a el índice de sustentabilidad del turismo propuesto por Pulido y Sánchez (Pulido & Sánchez, 2009) o el Índice Canadiense para la Sostenibilidad del Agua (PRI, 2007). Para la generación de los indicadores se tomó en cuenta trabajos previos con índices relacionados con la sustentabilidad del agua (OECD, 2008; Pandey et al., 2011; Singh et al., 2012) y elementos del modelo presión-estado-respuesta (Juwana et al., 2012).

Análisis por eje del desarrollo Sostenible

El análisis de la situación actual y en un futuro de Cozumel pueden generarse a partir la estimación del Índice Integrativo para el Manejo Sostenible de Acuíferos Insulares (IIMSAI). Cada indicador está diseñado para no abordarse de manera individual, sino como parte de todo un conjunto, primero como parte del dominio al cual pertenece y después como parte de todo el índice.

- **Ambiental**

Con relación a lo ambiental, se obtuvo una sumatoria total de 0.1 de 0.3. Los indicadores que obtuvieron una puntuación positiva están relacionados con el estado del acuífero (calidad del agua, amenazas), el suelo (AEn1) y la vegetación (AEn4) en la UGA C1. No existe información disponible para estimar al indicador sobre el estado de los cenotes (AEn 5) y aunque hay información sobre especies en Cozumel y el efecto de especies introducidas (AEn6), aún hacen falta estudios sobre la biota que habita dentro del acuífero. En general, se presenta una situación adversa para el acuífero en la isla de Cozumel debido a un incremento en la temperatura promedio mensual (AEn 2), una reducción en la precipitación mensual (AEn 3) y un incremento en la evapotranspiración (AEn 7). La evapotranspiración estimada con el método de Thornthwaite en bosques tropicales de México ha demostrado tener una relación significativa con el tamaño de plantas y la forma de vida (excepto en lianas) (Trejo & Dirzo, 2002), por lo que un aumento como el registrado en este trabajo, podría tener

repercusiones sobre la vegetación en la Isla. Además, los indicadores hidrometeorológicos considerados se relacionan con la recarga estimada del acuífero, la cual se ha reducido (AEs 4) en el periodo 1990-2019. Adicionalmente se incrementa la presión sobre el recurso, pues el volumen extraído de la UGA C1 (AEs 5) supera el 40% que es recomendable para mantener un ambiente estable (PRI, 2007); mientras que la cantidad de agua disponible (AEs 1), considerando un volumen de extracción de pozos sustentable de 40 L/seg estimado en 1978 (Lesser et al., 1978) es superado por un volumen de extracción de 143 L/seg en 2018. Además, el número de pozos disponibles para la extracción se ha reducido de manera importante al incrementarse los pozos clasificados como abatidos y en reposo durante el periodo 2005-2018 (AEs 6). Se estimó un ICA promedio de 39 en 2019 dentro de la UGA C1 (AEs 2), lo cual indica buena calidad de agua de los pozos activos muestreados. Aunque la buena calidad actual de estos pozos es alentadora, se debe considerar que el número de pozos disponibles para la extracción se ha reducido y hay contratiempos (mantenimiento y vandalismo) dentro de la UGA C1. También se identificó la necesidad de estudios sobre contaminantes dentro del área de pozos, en especial el eje tres, el cual es utilizado como vía de acceso a San Gervasio (AEs3). De continuar con las tendencias actuales, es muy probable que el número de los pozos disponibles para la extracción de agua se reduzca y se comiencen a presentar problemas con relación a la calidad de agua extraída. Actualmente ya hay reportes ciudadanos sobre el recorte de horarios en el servicio de distribución de agua y baja presión en las tuberías como se abordó en las entrevistas del Capítulo 3.

- **Económico**

En el aspecto económico se obtuvo una puntuación de 0.24 de 0.33. En general, el Caribe es la región a nivel mundial más dependiente del turismo (Meade & Pringle, 2008), pues en islas como Barbados, el turismo contribuye con 39.9% del PIB (1.8 Billones de dólares anuales) y 39.8% de empleo nacional (Schuhmann et al., 2019). Sin embargo, aunque la economía de Barbados se basa en el turismo, la demanda hídrica del sector turístico representó el 6%; mientras la demanda del sector doméstico y la agricultura fueron del 31 y 26% respectivamente (Ekwue, 2010). La situación en Cozumel es diferente, pues la actividad agrícola (EAe1) no es de alto impacto, por lo que sus volúmenes de consumo de agua son similares con los del sector industrial (EAe2). Aunque son necesarios trabajos posteriores

para monitoreo y análisis de las dinámicas del consumo real por parte del sector agrícola, sobre todo en aquellos que se encuentran dentro de la UGA C1. En las actividades económicas terciarias (EAe 3) se incrementó significativamente el volumen de agua consumida por el sector comercial dentro del periodo 2005-2018; pero en hoteles se mantuvo sin tendencia, a diferencia de un esperado incremento debido a las actividades económicas dominantes en Cozumel. Afortunadamente en la Isla se cuenta con un buen porcentaje de red de distribución de agua potable y alcantarillado, el cual supera al 95% en ambos casos (ESd 1 y ESd 2). Sin embargo, se identificó que un promedio de 26% del agua extraída de los pozos en UGA C1 no es facturado por los usuarios de CAPA (ESd 3), por lo que se considera como pérdidas del recurso en el sistema. El manejo de las fugas ha sido una parte esencial dentro del MIRH y es un problema importante en el Caribe, representando pérdidas de 18 a 40 % en Barbados y Trinidad y Tobago (Cashman, 2014; Ekwue, 2010). Por ello, se recomienda se complemente con una mejora de la atención del personal encargado con recepción de denuncias las 24 horas, un equipo para rápidamente atender las denuncias, así como incentivos y penalizaciones (Biswas et al., 2021).

- **Social**

En el aspecto social se obtuvo un valor de 0.13 de un total de 0.33. En Cozumel actualmente se desconoce el porcentaje de implementación de medidas ahorradoras de agua por parte de la población (SUt1), por lo que se requieren estudios posteriores. Se identificó la presencia regional de la deidad Ixchel, asociada con cenotes y agua subterránea (SUt 2), la cual se puede considerar como una base para desarrollar estrategias que incentiven en la comunidad el acercamiento al recurso hídrico, pues por el momento no existe alguna celebración o evento relacionado con el recurso (SUt 3) o algún espacio dedicado para la difusión de información e integración de usuarios dentro del MIRH (SUt5). Este acercamiento puede ser aprovechado para incidir sobre el sector doméstico (SUt 4), el mayor consumidor de agua por volumen y cuyo consumo se ha mantenido sin tendencia a pesar del incremento poblacional (SDe 1), coincidiendo con Barbados y Trinidad y Tobago, con el sector doméstico como el principal consumidor por volumen de agua (Ekwue, 2010).

El marco legal (SMj1) e institucional (SMj 5) se encuentran presentes, sin embargo su desempeño se ve afectado por falta de recursos y personal; aunque se reconoce la presencia

del POEL como instrumento para ordenamiento territorial (SMj 3). Hasta 2020, no se cuenta con un programa, plan o estrategia concreta para el MIRH en Cozumel (SMj 2), por lo que tampoco hay financiamiento disponible (SMj4).

Finalmente, la incidencia de enfermedades asociadas con organismos acuáticos (SDe3) no ha representado un impacto importante, pese al incremento poblacional y urbano (SDe2).

Previamente se han realizado índices en los que se abordan aspectos específicos de acuíferos, por lo que la integralidad se limita al no considerar indicadores ambientales, económicos y sociales. Por otra parte, se proponen índices cuyo número de indicadores es elevado y con lo que se dificulta su estimación, como el Índice de sostenibilidad para los Pequeños Estados Insulares en Desarrollo (ISPEID) (Van Beynen et al., 2018). Esta situación se complica aún más en países en desarrollo, donde el acceso a la información puede ser una limitante dentro del desarrollo de índices. Por ello, el IIMSAI es una opción viable para la integración y el análisis de información referente con el acuífero y que, junto con otros instrumentos, puede contribuir como base para el MIRH insular de Cozumel. De igual manera, el índice puede ser adecuado para su implementación en islas con características similares.

5.4.2 Modelo para el manejo sostenible del acuífero y propuesta de manejo integral

El MSAC es un instrumento útil para la implementación del MIRH en Cozumel, pues presenta una serie de pasos para el desarrollo de objetivos y su seguimiento. Una de sus principales ventajas es que se desarrolló con indicadores que fueron adecuados a las condiciones de la Isla; además de ser integrativo. Los índices presentan la limitante de tener que ajustar los indicadores dentro de una escala para asignarles un valor con base en algún criterio. Esto reduce la integralidad con la caracterización de elementos relacionados al objeto de estudio, pues difícilmente se le puede asignar una calificación al estado natural de algunos elementos cuya naturaleza es descriptiva, ejemplo: diferencias de altitud en terreno, espesor de la capa de agua dulce en el acuífero, cercanía de la mancha urbana al área de pozos de extracción, etc. Adicionalmente, los índices difícilmente incluyen una evaluación sobre las fechas en la que se estimó la información con la que se aborda a los indicadores, por lo que se podría estar estimando un indicador con información que no ha sido actualizado en un largo tiempo; aunque se ha reconocido que la actualización de la información es una

necesidad (Pandey et al., 2011). Por lo tanto, el MSAC contempla los índices con elementos descriptivos asociados con el manejo del acuífero y sin asignarles juicios de valor, junto con considerar el estado de actualización de la información disponible.

Los actuales modelos son herramientas para el MIRH y su efectividad sólo podrá ser medida con el paso del tiempo. Por ello, algunas de las propuestas de modelos actuales para el manejo de acuíferos están relacionados con planes de implementación y propuestas para el manejo del recurso. En otras islas se han aplicado estrategias como: conservación del agua, desarrollo continuo de fuentes locales de agua dulce, importación de agua, desalinización y la recuperación de agua y reúso (Gikas & Tchobanoglous, 2009). En la región del caribe, los Sistemas de Captación de Agua de Lluvia (SCAL) y la desalación de agua marina son estrategias comúnmente utilizadas dentro del manejo que aseguran la disponibilidad de agua dulce (CEHI, 2006; GWP, 2014; Rowe, 2011); sin embargo las limitantes de SCAL son la capacidad de almacenamiento y dependencia de la precipitación, mientras que las desaladoras implican elevados costos económicos y desconocimiento de sus efectos a largo plazo de (Fuentes-Bargues, 2014).

En lugares áridos que dependen del acuífero, como Texas en Estados Unidos, se ha abordado al manejo del recurso para asegurar su disponibilidad con la estrategia “toilet to tap”, la cual consiste en tratar el agua de desecho hasta su potabilización para reintroducirla al sistema de distribución o acuífero (Allan, 2009; Wythe, 2013). Otros planes de manejo se basan en modelaciones integrales y participación de usuarios (FACETS, 2021; Graham et al., 2020), marcos de acción como una guía general para la gestión del agua que requieren de constantes reevaluaciones para su modificación cuando sea necesario (Conservation Ontario, 2010) o enfocándose en los servicios de agua urbana (Biswas et al., 2021). Es por esto que el actual MSAC no es la solución para el MIRH en Cozumel, sino el punto de partida para un largo proceso de planeación, implementación, monitoreo, evaluación y reestructuración de estrategias para asegurar el agua en cantidad y calidad en el futuro.

5.5 Conclusiones

El Índice Integrativo para el Manejo Sostenible de Acuíferos Insulares es una herramienta útil para la integración y análisis de los principales elementos relacionados con el manejo sostenible del acuífero en Cozumel, pudiendo ser la base para la adecuación del mismo en islas con características similares.

La puntuación final del Índice Integrativo para el Manejo Sostenible de Acuíferos Insulares fue de 0.43, por lo que se clasifica dentro de “Insostenible”.

El Modelo Sostenible para el Acuífero de Cozumel (MSAC) es el resultado de la integración de información obtenida y generada de indicadores sobre el estado actual del acuífero en UGA C1, su entorno ambiental, las actividades económicas dependientes del recurso, servicios de distribución, usos y tradiciones del agua, demografía, aspectos de la salud y jurídicos relacionados con el agua potable.

El MSAC es una propuesta de una guía metodológica para el desarrollo de objetivos que definan estrategias políticas, institucionales, de financiamiento, integrativas y de divulgación en el corto, mediano y largo plazo con base la evaluación de información disponible y los elementos con los que se relaciona el acuífero.

Capítulo 6 – Discusión General

Los retos relacionados con el manejo del agua son grandes y el MIRH se ha posicionado como el medio más sostenible para incorporar los múltiples usos de los recursos hídricos (Jeffrey & Gearey, 2006). Aunque de reciente consolidación (1992), el concepto plantea la necesidad de un análisis y de marcos integrados interdisciplinarios, con los que se han generado nuevas líneas de investigación innovadoras para atender particularidades de cada zona (Mollinga, 2006). Es por ello que la integración de elementos de teorías como TGS y SSE contribuyen con evidencia para el enriquecimiento teórico y aplicativo del MIRH. Para abordar este Capítulo se propone el análisis de los siguientes elementos: a) la estructura institucional del agua y financiamiento, b) estructura organizacional de las estrategias de manejo, c) marco jurídico, considerando las funciones y atribuciones, d) instrumentos para el manejo, incluyendo los abordados en el trabajo de tesis, e) limitaciones en el trabajo de investigación y f) recomendaciones para futuras investigaciones. A continuación, se hará un análisis de estos elementos y su relación con el trabajo de tesis.

El Manejo Integral de los Recursos Hídricos es importante para asegurar la disponibilidad del agua en cantidad y calidad en el futuro. El término de crisis del agua denota una escasez de agua con buena calidad y se relaciona con las necesidades de la población, actividades productivas y el medio ambiente (Jain & Singh, 2010). En general, la escasez física se debe a una distribución espacio-temporal inequitativa del recurso y que puede ser acentuada por el cambio climático; mientras que un decremento en la calidad del agua se relaciona con el impacto generado por el aumento en la población y las actividades socioeconómicas (Oelkers et al., 2011; Sivakumar, 2011). En la región del Caribe, la sequía y la disponibilidad de agua se consideran como los principales retos para la sostenibilidad (Day, 2010). Si bien algunos autores consideran que a nivel global la actual crisis del agua no se relaciona con escasez física, sino con el mal manejo del recurso (Biswas & Tortajada, 2011); los resultados en este trabajo indican una reducción física importante en los volúmenes de precipitación junto con un aumento en la temperatura media, lo cual reduce directamente los volúmenes de recarga estimada en el acuífero de la zona de captación, como se señaló en el Capítulo 4.

Es importante reconocer que en Cozumel no hay un manejo integrativo para la sostenibilidad del acuífero, pues la responsabilidad del manejo recae principalmente sobre CAPA, como se

establece en los testimonios de los entrevistados (Capítulo 3) y se denota al no existir instrumentos de integración de usuarios dentro del manejo del recurso. Este modelo de operación institucional son remanentes del antiguo modelo centralizado de manejo del recurso hídrico, aunque en la organización actual se reconocen cuatro niveles de organización institucional (Perevochtchikova & Arellano-Monterrosas, 2008): federal (CONAGUA), regional (organismos de cuenca), estatal (direcciones locales en estados y organismos operadores de municipios) y local (ONGs y asociaciones civiles). Dentro de este modelo de organización los presupuestos para infraestructura son asignados por la federación, mientras que la municipalidad se encarga de lo relacionado con los servicios, lo cual genera confusión en las atribuciones de cada nivel y dificultades en el proceso para la asignación de recursos (Aguilar, 2010).

Económicamente CAPA depende del cobro de tarifas para generar ingresos que le permitan trabajos de mantenimiento y mejoras generales; sin embargo el presupuesto con el cual esto es posible se asigna desde las oficinas centrales, que sumado con los procesos burocráticos, retrasan la ejecución del recurso y reducen de manera importante la eficiencia de la institución. Tomando en cuenta que dentro del sector hídrico: el suministro, alcantarillado y tratamiento representan de las inversiones más altas de los servicios públicos (hasta 25 veces los ingresos anuales), es común encontrar prácticas de endeudamiento y recortes en el presupuesto (Cashman, 2012). Además se ha observado un funcionamiento independiente por parte del suministro de agua potable y el saneamiento, con poca planificación y cooperación intersectorial (Chene, 2009). Por estas razones, en otras regiones del mundo se considera exitosa la aproximación al MIRH en la cual se enfocan en el fortalecimiento de los servicios de agua, incrementando el número de usuarios dentro de la red de distribución e incentivando los pagos al corriente. Con esto se generan ingresos que son distribuidos y aplicados para el mantenimiento, mismos que se reflejan en mejoras en el servicio de agua potable (Biswas et al., 2021). En ese ejemplo de manejo, se prioriza la solvencia económica de las instituciones encargadas del manejo del recurso hídrico, pues el financiamiento es una de las principales razones por las cuales las estrategias para la sostenibilidad no son continuas a través del tiempo (GWPC, 2015). Además el dinero recaudado se reinvierte para la mejora del servicio y las instalaciones, con lo cual se brinda seguridad en el acceso del recurso al usuario y con ello se les incentiva estar al corriente con sus pagos por servicio (Biswas &

Tortajada, 2010). Desafortunadamente en los modelos de financiamiento del Caribe aún se maneja un modelo centralizado donde las instituciones difícilmente son económicamente autosuficientes (Cashman, 2014). Por ello, en Cozumel es necesario un esquema que permita que CAPA cuente con financiamiento económico para atender las necesidades de una manera eficiente; pues de acuerdo con resultados de este trabajo (Figura 15) en la zona de captación existe una necesidad de mantenimiento, vigilancia de las instalaciones y apoyo para el monitoreo de los pozos, pues se reportó una reducción en el número de muestreos a los pozos de 1,683 en 2013 a 285 en 2017. Si bien dentro de los años 1989 a 2006 se consideraba que los organismos operadores no tenían capacidad técnica suficiente y sus finanzas eran débiles por la falta de tarifas adecuadas (Jiménez et al., 2010), actualmente el principal problema parece ser una falta de manejo apropiado del recurso económico dentro de las instituciones. Esto de acuerdo con información sobre las tarifas del agua estimadas dentro del Capítulo 4, pues al utilizar la información del sector hotelero presentada dentro de las tablas 11 y 12, se obtiene un ingreso estimado promedio diario de \$ 2,363,066 pesos por el cobro de servicio de agua al sector hotelero (consumo promedio por usuario en sector hotelero= 17.22 m^3 * Número de usuarios hoteleros promedio =58 * costo por metro cubico promedio del sector hotelero = \$ 2,366). A este estimado de ingresos por cobro de servicio al sector hotelero se le debe añadir el cobro de servicio de los demás sectores, con lo cual se obtiene una suma importante de dinero generado mensualmente en Cozumel. De acuerdo con información de CAPA, se reportó para el año 2019 un presupuesto general aprobado para mantenimiento de 10,431 miles de pesos, mientras que el presupuesto para el despacho de la gerencia del organismo operador en Cozumel ascendió a 51,300 miles de pesos (CAPA, 2019). Por ello, se requiere de un esquema institucional y legal en el cual sea prioritario que el dinero generado en Cozumel se utilice para el mantenimiento y fortalecimiento del servicio en la Isla, para después enviar el dinero sobrante a oficinas centrales y que se utilice para atender las necesidades de CAPA en un nivel estatal. De esta manera, CAPA Cozumel se fortalecería al contar con presupuesto suficiente para atender las instalaciones, monitoreos, mejorar el servicio, reducir fugas y capacitación de personal, con lo que se mejoraría el servicio brindado, favoreciendo que los diferentes usuarios notaran el efecto de su pago sobre un servicio de calidad y con ello se generaría un ambiente de confianza entre el usuario.

El asignar al presupuesto desde oficinas centrales es evidencia de que las decisiones institucionales de manejo actual siguen un esquema “arriba-abajo”. A pesar de esto, CONAGUA ha realizado esfuerzos para su descentralización institucional como: la creación del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) en 1992, el empoderamiento de las 12 regiones hídricas en 1997 y la creación de los Comités de Aguas Subterráneas o COTAS, (CONAGUA, 2018a; Guerrero, 2019; López, 2017). Desafortunadamente este esquema de manejo basado en el estado se presenta a lo largo de la región del Caribe en donde rara vez actores fuera del sector público, como el sector privado, los clientes, las organizaciones no gubernamentales y las organizaciones comunitarias alcanzan un nivel de influencia significativo (Cashman, 2017). Para un adecuado MIRH se requiere de la integración de los usuarios, basándose en estrategias “abajo-arriba” y complementando con las “arriba-abajo”; favoreciendo la meta de obtener resultados justos en una manera inclusiva que encaminen a políticas hídricas sostenibles y prácticas de manejo bajo los principios de efectividad, eficiencia, confianza y participación (Akhmouch & Correia, 2016; OECD, 2015). Estos principios son parte de la gobernanza del agua, la cual es definida por la AMA como: “la gama de sistemas políticos, sociales, económicos y administrativos que existen para desarrollar y gestionar los recursos hídricos y la prestación de servicios de agua en diferentes niveles de la sociedad” (Rogers & Hall, 2003:2). De hecho, los sistemas de gobernanza forman parte de los subsistemas centrales que se encuentran dentro del marco establecido para analizar los SSE (Ostrom, 2009) y cuyos elementos son abordados en el presente trabajo dentro del análisis del rol del gobierno e instituciones, así como el marco legal para el MIRH en Cozumel.

Para mejorar la gobernanza del agua es necesario de la redacción y adopción de una legislación que propicie el entorno adecuado y establezca el marco institucional para el manejo del recurso (Cashman, 2017; Liehr et al., 2017). Legalmente hablando, la propiedad del agua se define dentro del Artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en donde se declaran las aguas como propiedad originaria de la nación. En 1992 se promulga la Ley de Aguas Nacionales (DOF, 2020b) con la que se establece el marco jurídico para el manejo del agua en México y se crean los consejos de cuenca. Los consejos de cuenca son mecanismos de participación compuestos por órganos colegiados de integración mixta que fungen como instancias de coordinación y concertación, apoyo,

consulta y asesoría entre la CONAGUA, las dependencias, entidades de los tres niveles de gobierno y usuarios de agua (CONAGUA, 2012); mismos que se apoyan de órganos como los Comités Técnicos de Aguas Subterráneas (COTAS) para abordar las particularidades de cada zona. Desafortunadamente en la región de la Península de Yucatán sólo se ha creado la COTA 88 para atender al acuífero en Mérida, sin considerar a Cozumel. Dentro de un documento oficial CONAGUA argumenta que en la región de la Península de Yucatán no se han constituido COTAS “...debido a la alta disponibilidad del recurso, lo cual no ha demandado el establecimiento de COTAS.” (CONAGUA, 2012: 22). Pareciera que este argumento no es suficiente para justificar la ausencia de más COTAS dentro de la región, pues en diferentes estudios mencionados a lo largo de este trabajo se han evidenciado problemas de escasez, manejo y calidad del agua. Además en el presente trabajo se ha demostrado en Cozumel un decremento en las dinámicas de recarga del acuífero y un incremento en la demanda, por lo cual la disponibilidad no debe considerarse como “alta”, ni asumir una buena calidad perpetua, pues existen evidencias de contaminación (Gutiérrez-Aguirre et al., 2008; Koch et al., 2017). El problema con la ausencia de un COTAS para Cozumel se refleja en la falta de reconocimiento de las particularidades y la importancia del acuífero dentro del marco Institucional hídrico en México, una reducción en la representatividad de los ambientes insulares y una limitación del alcance del MIRH en la Isla al no generar sinergia a nivel federal-local para el diseño de instrumentos que incentiven la integración de usuarios en el manejo del recurso. Además de incidir negativamente sobre la gobernabilidad, pues se limitan las posibilidades de los sistemas políticos, sociales, económicos y administrativos existentes para desarrollar y gestionar los recursos hídricos. Por ende, es necesario el tomar provecho de los mecanismos legales e institucionales vigentes que incentiven la constitución de un COTA para el acuífero en Cozumel, para con ello contribuir con definir objetivos y plantear estrategias alineadas con el marco legal e institucional vigente para el MIRH.

Si bien para la implementación del MIRH en Cozumel se requiere de generar un ambiente propicio institucional y legal, también se requiere de los instrumentos adecuados. En general, CONAGUA mantiene un monitoreo de la recarga de los acuíferos y un estimado de la calidad con la que cuentan. Sin embargo, estos monitoreos son insuficientes (en parte por las razones expuestas dentro del trabajo de tesis), pues no son el producto de criterios científicos sino del

aprovechamiento del recurso; por lo que se requieren de estudios en donde atiendan las particularidades de los procesos que describen a los acuíferos y el consumo por los diferentes usuarios (Schmidt & Hatch, 2012). Además, las estimaciones de recarga por CONAGUA son esporádicas y en una escala anual, por lo que no es posible observar una estacionalidad ni dinámicas en los procesos; mismos que son importantes para ambientes como Cozumel, pues la estacionalidad en la precipitación es la fuerza impulsora predominante para la ecología de plantas y animales (Trejo & Dirzo, 2002). Por ello, se debe establecer una red de monitoreo sobre los elementos relacionados con el acuífero, además de un sistema de información sobre los elementos que son fundamentales para el MIRH (AMA, 2009; Perevochtchikova & Arellano-Monterrosas, 2008), como los abordados en el presente trabajo. Dentro del Caribe se han incentivado y creado iniciativas para el constante monitoreo de elementos relacionados con el MIRH y cuyos resultados se han utilizado para alimentar una base de datos relacionada con el agua de un país; siendo de vital importancia para tomar decisiones informadas por los administradores y los responsables de la formulación de políticas, quienes requieren de información oportuna con base en datos sólidos y relevantes para las necesidades de la sociedad (Senecal & Madramootoo, 2013).

Para este trabajo la información actualizada sobre los elementos relacionados con el acuífero en Cozumel consolidan la base para la caracterización de la zona de estudio, el recurso y sus usuarios; pues es muy importante contar con bases de información actualizadas (AMA, 2009). Por ello, como primer paso dentro de la generación de un modelo sostenible para el acuífero en Cozumel se realizó una caracterización de los aspectos relacionados con el recurso hídrico (Capítulo 3). Se identificó un incremento en el número de pozos clasificados como abatidos y en reposo de acuerdo con los criterios utilizados por CAPA, además de señalar al sector doméstico y turístico como los principales consumidores de agua de acuerdo con la percepción de usuarios relacionados con el recurso.

En el Capítulo 4 se adecuaron herramientas metodológicas a las características de la Isla para determinar la calidad del agua en UGA C1 (índice de calidad de agua), el estado de las prácticas locales hacia sostenibilidad (índice de sostenibilidad de ambientes cársticos), el volumen de tratamiento en agua residual, el costo por el servicio de distribución, el consumo por la población y turismo en Cozumel. La calidad del agua es un elemento básico para la

caracterización de los acuíferos, por lo que su monitoreo contribuye con el adecuado manejo del recurso (WRC, 2011). El índice de calidad de agua (ICA) se adecuó al considerar 11 parámetros indicadores de calidad de agua. En el caso del ICA se propuso la inclusión de algunas variables indicadoras de calidad de agua como: temperatura, OD, salinidad, CE, N-NO_2^- y N-NO_3^- . La temperatura se relaciona con procesos biológicos y de disolución, siendo una variable importante para determinar flujos subterráneos en ambientes cársticos y con la cual se han identificado variaciones en los cuerpos de agua en años recientes debido al cambio climático (Cokorilo et al., 2019; Saito et al., 2016). El oxígeno disuelto es considerado un parámetro crítico dentro de los estudios de contaminantes en agua subterránea por su relación con los estados de oxidación, así como su importancia para la presencia de la vida (Rose & Long, 1988). La salinidad y conductividad están asociadas con la presencia de intrusiones salinas en acuíferos cársticos (Deng et al., 2017). Finalmente la presencia de nitritos y nitratos pueden ser indicador de contaminación, así como su importancia por sus efectos adversos sobre la salud humana (Gutiérrez et al., 2014; Pacheco & Cabrera, 2003). La inclusión de estos elementos permite una caracterización de las particularidades y posibles amenazas en la calidad del agua subterránea de Cozumel, pues con ellos es posible hacer un comparativo con estudios previos e identificar posibles variaciones en estos indicadores. Además, con las adecuaciones descritas para pH y temperatura, se estandariza con una escala de medición lineal para todos los parámetros y se fijan los valores medios de cada parámetro como referente del valor óptimo. Este método propuesto puede ser replicado en otros acuíferos cársticos, incentivando la adecuación de un índice específico para cada acuífero en el cual se consideren las particularidades (valores de las variables indicadoras de calidad de agua de estudios regionales previos) como parte de monitoreos para el MIRH. De igual manera, las adecuaciones al ISAC y en los Indicadores de Servicios de distribución (ISD) se realizaron para reflejar la situación en Cozumel, por lo que se sugiere que en caso de replicarlas se comience con su adecuación a las condiciones de la zona de estudio. Es recomendable que los reportes sobre la calidad del agua sean accesibles o difundidos a los usuarios. La difusión de la calidad del agua a los usuarios es una medida que se realiza anualmente en los Estados Unidos por parte de los organismos encargados del manejo y que también es parte de la información disponible dentro de la factura del agua en Puerto Rico (EPA, 2021; Heartsill, 2012). La difusión es una herramienta útil dentro de la

implementación del MIRH, pues el conocimiento sobre el estado del acuífero debe ser compartido, de otra manera es de poca utilidad para el avance de la sociedad y el manejo del recurso (Senecal & Madramootoo, 2013). Además, la falta de información básica adecuada sobre los recursos hídricos, sus usos y también el funcionamiento del sector del agua no favorecen con el avance de las estrategias y objetivos del manejo del agua (Chene, 2009).

Dentro del presente trabajo se reconocen los hoteles como el sector con el mayor consumo de agua por usuario, información relevante ya que forman parte de la principal actividad económica de la Isla. Para abordar el manejo de la demanda hídrica por parte del sector turístico Bates et al. (2014), proponen el empleo de dos estrategias principales: manejo de la demanda (reducir el uso del recurso) y manejo de la oferta (aumento de las provisiones de agua). Dentro del manejo de la demanda, se consideran el monitoreo y uso eficiente de jardines, albercas, habitaciones y cocinas mediante programas de educación al personal e implementación de prácticas ahorradoras de agua (Gössling et al., 2012). El manejo de la oferta considera las capacidades necesarias para aumentar el agua disponible como desaladoras y captación de agua de lluvia. En el caribe, esta son estrategias comúnmente utilizadas en islas en las que se ha optado por reducir la presión sobre el acuífero a la vez que se suple la demanda del recurso, como en Jamaica y Barbados (CEHI, 2006; FAO, 2015). Sin embargo la captación de agua de lluvia tiene la limitante de depender de los volúmenes de precipitación y el espacio disponible para el almacenamiento; mientras que las desaladoras conllevan un elevado costo productivo y se desconocen los efectos en el medio ambiente al mediano y largo plazo (Aladenola & Cashman, 2016; Heartsill, 2012). Por ello, la opción más viable sería la de implementar un manejo de demanda en los hoteles junto con sistemas de captación de agua de lluvia, con lo cual se podría reducir la presión sobre el acuífero de Cozumel, minimizando el impacto económico sobre el sector.

De acuerdo con los resultados expuestos en el Capítulo 4 y 5, los índices son una excelente herramienta para la caracterización de los elementos relacionados con el acuífero en Cozumel. Sin embargo, los índices tienen la limitante de considerar únicamente aquellos indicadores en los cuales se les pueda asignar una puntuación con base en una escala de valor, por lo que es difícil integrar aquellos elementos descriptivos y valiosos para el MIRH como: la ubicación geográfica de rellenos sanitarios o la ubicación de pozos profundos de extracción

con base en su calidad del agua. Por ello, los índices deben complementarse con mapas, entrevistas y el análisis de las dinámicas de indicadores hidrometeorológicos e hidrológicos, así como herramientas no contempladas en este trabajo con los que se pueda contribuir con el MIRH en un futuro. Esto permite contemplar una imagen más integral de la situación y los elementos asociados con el recurso, coincidiendo con lo planteado dentro de la TGS, así como con el enfoque sistémico planteado por Martínez 2006 al considerar las dinámicas e interacciones que inciden sobre el sistema (acuífero). Uno de los primeros documentos en los cuales se abordó con el enfoque de la TGS al manejo de los recursos fue en los límites del crecimiento (1972), pues es un esfuerzo multidisciplinario e integrativo para hacer proyecciones sobre posibles escenarios del futuro con relación a la disponibilidad de recursos. Aunque son pocos los trabajos en donde explícitamente se utiliza la TGS para el MIRH (Rodríguez, 2006; Saravanan, 2008; Simonovic, 2020); en aquellos estudios donde se maneja el concepto de integralidad en el MIRH, este coincide con la visión no mecanicista de la TGS al buscar manejar los recursos hídricos como un todo integrado de sus componentes subsidiarios de una manera comprensiva y holística (Kresh, 2006; Van Der Zaag & Savenije, 2014b). Por ello, aquellos trabajos de manejo del recurso hídrico que sean integrales, por lo general están alineados con los conceptos de la TGS. Después de todo, la aplicación del enfoque de sistemas para la gestión del agua ha proporcionado estrategias comprobadas en la resolución de los desafíos de la gestión de los recursos hídricos, además de haber ayudado a comprender de manera integral la gestión del agua como un proceso sociopolítico (Simonovic, 2020). Complementariamente con la TGS, varios de los elementos considerados dentro de los indicadores y el trabajo de tesis forman parte de la teoría de SSE. Los SSE se han utilizado en estudios para reconocer las conexiones que vinculan los sistemas humanos y naturales, pues su marco de trabajo permite integrar información de ciencias naturales y sociales para probar una hipótesis (Weaver et al., 2015). Originalmente en la aproximación teórica de Ostrom (2009) se evalúa la posibilidad de auto organización de los usuarios para el desarrollo de instituciones de gobernanza locales. La aproximación de los SSE sintetiza variables utilizadas en estudios previos con un enfoque más detallado al considerar cuatro subsistemas: sistema de recursos, unidades de recursos, sistema de gobierno y usuarios de recursos, con lo que es posible cerrar la brecha teórica y práctica (Hileman et al., 2015), siendo estos subsistemas considerados dentro de estudios para el

MIRH (Bohensky, 2006; Hummel et al., 2017; Liehr et al., 2017). Elementos de estos subsistemas fueron esenciales para la selección de indicadores relacionados con el acuífero insular, mismos que contribuyeron con el desarrollo del Modelo Sostenible para el Acuífero de Cozumel (MSAC); como la productividad del sistema (dinámicas de recarga), el valor económico (Tarifas por metro cúbico), organizaciones gubernamentales (CAPA y CONAGUA) y el número de usuarios (ISD).

El MSAC es una propuesta metodológica para abordar la sostenibilidad del acuífero en Cozumel. En general, los modelos de manejo sostenible en acuíferos son también una guía para la implementación del MIRH, pues abordan prioridades basadas en las necesidades de la región y son por lo general esfuerzos multidisciplinarios como se ha observado en los trabajos de Biswas et al. (2021) y Conservation Ontario (2010). Los modelos para la implementación del manejo del recurso cumplen con una estructura básica que consta de evaluación, identificación de problemas, desarrollo de estrategias (implementación), monitoreo y reajuste, aunque no necesariamente en el mismo orden (CEHI & GEF, 2007; Conservation Ontario, 2010; WRC, 2011). Sin embargo, las estrategias para la implementación aún presentan desafíos, siendo de los principales el seguimiento y el financiamiento (GWPC, 2015). De acuerdo con los resultados de calidad de agua y estado de los pozos en el área de captación, en Cozumel es prioritario abordar el manejo sostenible del acuífero en UGA C1. Para ello, una alternativa viable es la repartición de responsabilidades por parte de CAPA con las instituciones académicas, organizaciones no gubernamentales y usuarios para el monitoreo y mantenimiento de la UGA C1. Con esta medida, las Universidades se beneficiarían al fomentar la formación de recursos locales, desarrollo de investigación e incidencia en la resolución de problemáticas locales (Beekman & Biswas, 1998).

Dentro del presente estudio se reconoce una falta en la caracterización de los sectores que extraen directamente el recurso del acuífero. Idóneamente dentro del estudio se debería haber incluido a los usuarios del REPDA dentro de la UGA C1, pues su impacto sobre el volumen del acuífero es directo. Sin embargo, se presentaron las limitantes de tiempo, accesibilidad de la información y recursos para desarrollar esa parte del proyecto. Adicionalmente hay una falta de información actualizada sobre islas con características hidrogeológicas y actividades

socioeconómicas similares, por lo que se dificulta la planeación de estrategias por la reducida disponibilidad de documentos de referencia. Si bien existe información sobre algunas islas dentro del Caribe presentada por instituciones como Global Water Partnership o autores como Cashman, por lo general es referente a un solo tema como: cambio climático (Cashman et al., 2010; Pulwarty et al., 2010), aguas residuales (Nurse et al., 2012; Peters, 2015) o sostenibilidad del MIRH en la región (GWPC, 2015). Esto es entendible, pues no existe una receta para abordar el MIRH, por lo que la diversidad de enfoques corresponde con la diversidad de ambientes y sus requerimientos particulares para el manejo del recurso. Además, los reportes disponibles en internet son esporádicos, por lo que se desconocen a profundidad las dinámicas de los indicadores que en ellos se describen, como el consumo del agua por los diferentes sectores. Sin embargo, sería de gran utilidad que cada isla generara un documento compilatorio sobre los elementos relacionados con el manejo de su respectivo recurso hídrico (incluyendo los elementos abordados en este trabajo de tesis), para que otras islas pudieran consultar y considerar como una base para generar sus propias caracterizaciones regionales de elementos relacionados con el acuífero. De esta manera se podrían evaluar y compartir el avance de diferentes estrategias, para con ello comenzar una comunidad de intercambio de información para fortalecer el MIRH en ambientes insulares. Este concepto es similar con lo que se tenía planteado en el Caribe con los Sistemas nacionales de información sobre el agua (NWS), una base de datos para la información relacionada con el agua de un país y una poderosa herramienta de apoyo a la toma de decisiones que surgió como parte de la Iniciativa del Agua del Caribe (CARIWIN) y que se implementó del 2006 al 2012 (Senecal & Madramootoo, 2013). El problema con estas iniciativas es que una vez que terminan con el plazo que tienen establecido para el proyecto, es difícil que se les dé continuidad a los programas de trabajo, por factores como el financiamiento o la disponibilidad de personal. Aunque ya existen instituciones como la Comunidad del Caribe (CARICOM), quienes en 2010 se propusieron ayudar a los estados miembros para desarrollar e implementar sus planes de MIRH, facilitar la evaluación de los recursos hídricos nacionales, identificar temas prioritarios y ayudar con la actualización de la legislación del agua (Cashman, 2017); la realidad es que los productos de estas acciones o la información sobre ellas no es accesible mediante plataformas electrónicas y se desconocen reportes más allá del 2014 (CARICOM, 2021).

Finalmente, de acuerdo con la información generada y el MSAC se sugiere en el corto plazo en estudios posteriores el realizar muestreos de calidad del agua en la UGA C1 en dos temporadas (lluvias y estiaje) para comprobar si existe una diferencia en la calidad del agua. Esto, tomando en cuenta que dentro del apartado grupos de agua en el Capítulo 3 se observaron diferencias significativas dentro de la calidad del agua que pueden ser atribuidas a la temporada de colecta. También es necesario la caracterización con detalle del sector turístico y su relación con el recurso hídrico en la Isla, permitiendo describir el aprovechamiento del recurso considerando elementos como el agua virtual y consumo energético, para con ello identificar prioridades dentro del manejo (Gössling, 2015). Esta información, junto con los elementos descritos en este trabajo de tesis debe ser compilada y analizada dentro de un sistema de información, un Observatorio para la Sostenibilidad del Acuífero (OSA). Es necesario el evaluar los mecanismos legales e institucionales para generar una colaboración con CAPA. Complementariamente se requiere de un grupo multidisciplinario entre CAPA e investigadores locales para el análisis de la información del OSA y con lo cual se puedan identificar problemáticas, definir objetivos, prioridades y estrategias para el MIRH. Por otra parte, para atender el financiamiento de estas acciones se sugiere crear un grupo encargado de la búsqueda, trámite y/o generación de financiamiento para atender problemáticas y solventar las estrategias fijadas por el grupo multidisciplinario. Por último, se requieren mecanismos de difusión de información sobre las acciones tomadas para ir preparando un ambiente de conexión entre los usuarios y el recurso hídrico de Cozumel.

En el mediano plazo se sugiere de la integración de usuarios de los diferentes sectores relacionados con el acuífero dentro del grupo multidisciplinario. En este punto se espera que, gracias a la difusión, los usuarios ya cuenten con información actualizada sobre el estado, retos y estrategias del MIRH. El grupo multidisciplinario entonces deberá plantearse como objetivo la creación de una COTA específica para Cozumel. Finalmente, se deben evaluar los instrumentos del OSA, las decisiones del grupo multidisciplinario y el financiamiento.

En el largo plazo, se sugiere evaluar todas las acciones previas para considerar objetivos alcanzados, atender situaciones no contempladas y verificar el adecuado funcionamiento de cada uno de los elementos para contribuir con el MIRH y la sostenibilidad del acuífero de

Cozumel. Además, contemplar la creación de políticas, instituciones e instrumentos para atender la biodiversidad local, suelo y el manejo de costas en Cozumel, como parte de incentivar una integralidad en el manejo del recurso hídrico.

Capítulo 7 – Conclusiones Generales

En el presente trabajo se desarrolló un modelo de manejo sostenible para el acuífero en el área de captación de Cozumel fundamentado en la teoría general de sistemas y el concepto de la teoría de sistemas socio ecológicos, considerando modificaciones en los indicadores sobre el estado actual del acuífero en UGA C1, su entorno ambiental, las actividades económicas dependientes del recurso, servicios de distribución, usos y tradiciones del agua, demografía, aspectos de la salud y jurídicos relacionados con el agua potable.

En el Índice de Calidad del Agua se consideró pH, temperatura, OD, salinidad, CE, STD, Cl^- , DT, SO_4^{2-} , $N-NO_3^-$ y $N-NO_2^-$ por su relevancia en la caracterización de procesos en ambientes cársticos subterráneos; obteniendo un valor promedio de 39 para los pozos muestreados dentro de la UGA C1, por lo que se clasifica como “excelente”.

En el Índice de Sostenibilidad de Ambientes Cársticos se adecuaron y añadieron indicadores para considerar el acceso al recurso de hablantes nativos, participación de universidades en la divulgación, la integración de usuarios en la toma de decisiones, prácticas de ahorro en el sector doméstico, tendencias de consumo del recurso, registro de recargas anuales, mantenimiento de la zona de captación, mecanismos legales de protección de la zona, prácticas de ahorro del recurso en establecimientos comerciales, volumen de agua extraído en UGA C1 y el empleo local en el suministro, con lo que se determinó que en la Isla se está progresando hacia prácticas para el manejo sostenible.

En los Indicadores de Servicios de Distribución:

Se utilizó el volumen de agua total facturado por cada sector atendido por CAPA como el volumen de agua residual generado, con el cual se calculó el porcentaje de agua residual que es tratada dentro de la Planta de Tratamiento Residual “San Miguelito”, estimando un valor promedio de 100%.

Se consideraron los actuales bloques de costo por volumen de agua establecidos por CAPA para los diferentes sectores con los que se estimó el costo promedio por metro cúbico de agua para cada sector en Cozumel, identificando al sector hotelero con la tarifa más alta y al doméstico con la más baja.

Se estimó el consumo por día con base en el registro de usuarios inscritos en CAPA para los diferentes sectores, identificando al sector hotelero como el mayor consumidor por usuario de agua en la Isla.

Se estimó un valor de 0.43 en el Índice Integrativo para el Manejo Sostenible de Acuíferos Insulares, por lo que se clasifica como insostenible al actual manejo del acuífero en Cozumel.

Aunque con los indicadores se estimó una excelente calidad de agua en pozos muestreados en la UGA C1, una totalidad de volúmenes de agua tratada, las tarifas vigentes para cada sector y consumo por usuario; los indicadores no contemplan aquellos elementos en los cuales no es posible asignarles una escala de valor, por lo que se recomienda complementar los índices con herramientas como mapas, entrevistas y el análisis de las dinámicas de indicadores hidrometeorológicos e hidrológicos que contribuyan con la caracterización de la zona de estudio.

El MSAC es una propuesta de una guía metodológica para establecer objetivos y fijar estrategias que contribuyan al MIRH en Cozumel. Según este modelo propuesto, se detectó que:

En el corto plazo, es necesario considerar para el manejo del agua de la isla el generar un sistema de información para el monitoreo, compilación y análisis de los indicadores propuestos en este trabajo, un grupo multidisciplinario compuesto por personal de CAPA y universidades para analizar esta información e identificar problemáticas, objetivos y estrategias, un grupo encargado de encontrar o desarrollar financiamiento y generar espacios o medios para la difusión.

En el mediano plazo es necesario la integración de usuarios de los diferentes sectores a el grupo multidisciplinario, impulsar la creación de una COTA para el acuífero de Cozumel, la evaluación y el monitoreo de los productos resultantes del análisis del sistema de información y las decisiones del grupo multidisciplinario; así como el reajustar estrategias, objetivos y financiamiento en caso de ser necesario.

En el largo plazo se requiere de evaluar todas las acciones previas para considerar objetivos alcanzados, atender situaciones no contempladas y verificar el adecuado funcionamiento de

cada uno de los elementos para contribuir con el MIRH y la sostenibilidad del acuífero de Cozumel.

8 Referencias

- Aguilar-Duarte, Y., Bautista, F., Mendoza, M. E., Frausto, M. O., Ihl, T., & Delgado, C. (2016). Ivaky: índice de la vulnerabilidad del acuífero kárstico yucateco a la contaminación. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 15(3), 913–933.
- Aguilar-Duarte, Y., Bautista, F., Mendoza, M., Ihl, T., & Frausto, M. O. (2014). *Propuesta de IVAKY: índice de vulnerabilidad del acuífero kárstico yucateco a la contaminación*. En 10 Soluciones para el manejo sustentable del agua - Península de Yucatán (Segunda Ed). Fundación ICA.
- Aguilar, I. A. (2010). Calidad del agua: *Un enfoque multidisciplinario*. En Instituto de Investigaciones Económicas UNAM, Ciudad de México.
- AHC, (Asociación de Hoteles de Cozumel). (2021). *Respuesta a su solicitud del Oficio UQROO/DDS/DCH/GHF001*, Cozumel, Quintana Roo.
- Ahmad, I., Tang, D., Wang, T., Wang, M., & Wagan, B. (2015). Precipitation trends over time using Mann-Kendall and spearman's Rho tests in swat river basin, Pakistan. *Advances in Meteorology*, 15. <https://doi.org/10.1155/2015/431860>
- Akhmouch, A., & Correia, F. N. (2016). The 12 OECD principles on water governance – When science meets policy. *Utilities Policy*, 43, 14–20. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2016.06.004>
- Aladenola, O., & Cashman, A. (2016). Impact of El Niño and Climate Change on Rainwater Harvesting in a Caribbean State. *Water Resources Management*, 3459–3473. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1362-2>
- Alcocer, J., Lugo, A., Marín, L. E., & Escobar, E. (1998). Hydrochemistry of waters from five cenotes and evaluation of their suitability for drinking-water supplies, Northeastern Yucatan, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 6, 293–301.
- Allan, G. R. (2009). Toilet to Tap: Making a Case for Indirect Potable Reuse. *Opflow*, 35(2), 8–8. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8701.2009.tb02967.x>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56 - Crop Evapotranspiration*. Food and Agricultural Organization, Roma, Italia.
- Alley, W. M. (1984). On the Treatment of Evapotranspiration, Soil Moisture Accounting, and Aquifer Recharge in Monthly Water Balance Models. *Water Resources Research*, 20(8), 1137–1149. <https://doi.org/10.1029/WR020i008p01137>
- Álvarez-Legorreta, T. (2011). Uso y manejo de los recursos hídricos. En S. Pozo, C., Armijo Canto, N. y Calmé (Eds.), *Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un análisis para su conservación*, Tomo I. El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno del Estado de Quintana Roo y Programa de Pequeñas Donaciones (PPD).
- Álvarez del Castillo-Cárdenas, P. A., Reyes-Bonilla, H., Álvarez-Filip, L., Millet-Encalada, M., & Escobosa-González, L. E. (2008). Cozumel Island, México: A disturbance history. *Proceedings of the 11th International Coral Reef Symposium, Ft. Lauderdale, Florida, 7-11 July 2008*, 8(18), 701–705. [https://doi.org/\(Ybp\)9672786](https://doi.org/(Ybp)9672786)
- AMA, (Asociación Mundial para el Agua). (2000). *Manejo integrado de recursos hídricos*. TAC background papers NO. 4 (1era ed.). Global Water Partnership, Suiza.

AMA, (Asociación Mundial para el Agua). (2009). *Manual para la gestión integrada de recursos hídricos en cuencas*. Global Water Partnership & Red Internacional de Organismos de Cuenca.

AMA, (Asociación Mundial para el Agua). (2017). *Why and How to Use the IWRM ToolBox*. Consultado el 19 de Mayo de 2021 en: https://www.gwp.org/en/learn/iwrmtoolbox/About_IWRM_ToolBox/Why_and_How_to_Use_the_IWRM_ToolBox/

AMA, (Asociación Mundial para el Agua). (2018). *The Enabling Environment (A)*. Consultado el 19 de Mayo de 2021 en: <https://www.gwp.org/en/learn/iwrmtoolbox/The-Enabling-Environment/>

Aparecido, L. M. T., Miller, G. R., Cahill, A. T., & Moore, G. W. (2016). Comparison of tree transpiration under wet and dry canopy conditions in a Costa Rican premontane tropical forest. *Hydrological Processes*, 30(26), 5000–5011. <https://doi.org/10.1002/hyp.10960>

Arellano. (2019). *Contaminados, 70% de cuerpos de agua en México: especialistas*. La Jornada. Consultado en: <https://www.jornada.com.mx/2018/05/27/sociedad/034n1soc>

Arroyo-Castro, J. L., Alvarado-Flores, J., Uh-Moo, J. C., & Koh-Pasos, C. G. (2019). Monogonot rotifers species of the island Cozumel, Quintana Roo, México. *Biodiversity Data Journal*, 7. <https://doi.org/10.3897/BDJ.7.e34719>

Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1976). *Water quality for agriculture*. Food and Agricultural Organization.

Ayuntamiento del Municipio de Cozumel. (2005). *Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Cozumel, Quintana Roo*. Quintana Roo, México.

Ayuntamiento del Municipio de Cozumel. (2006a). *Programa Parcial de Desarrollo Urbano 4 (Zona Surponiente) de Cozumel, Quintana Roo*. Quintana Roo, México.

Ayuntamiento del Municipio de Cozumel. (2006b). *Reglamento medio ambiente y ecología del municipio de Cozumel, Quintana Roo*. Periódico Oficial del Gobierno del Estado de Quintana Roo. Quintana Roo, México.

Ayuntamiento del Municipio de Cozumel. (2008). *Programa de ordenamiento ecológico local del municipio de Cozumel, Quintana Roo*. Quintana Roo, México.

Ayuntamiento del Municipio de Cozumel. (2011a). *15 Sesión extraordinaria y modificación de UGAs*. Quintana Roo, México.

Ayuntamiento del Municipio de Cozumel. (2011b). *Agenda 21, Isla de Cozumel*. En Ayuntamiento de Cozumel. Quintana Roo, México.

Ayuntamiento del Municipio de Cozumel. (2011c). *Atlas de riesgos del municipio de Cozumel. Municipio de Cozumel*, SEDESOL. Quintana Roo, México.

Ayuntamiento del Municipio de Cozumel. (2019). Plan Municipal de Desarrollo Cozumel. En *Periódico oficial del estado de Quintana Roo*. Quintana Roo, México, 841–1024.

Ayuntamiento del Municipio de Cozumel. (2020). En *Cozumel no se toleran actos que atenten contra la naturaleza*. Ayuntamiento Municipal de Cozumel. Consultado en: <https://cozumel.gob.mx/prensa/en-cozumel-no-se-toleran-actos-que-atenten-contra-la-naturaleza/>

Ayuntamiento del Municipio de Cozumel. (2021). *Suman esfuerzos Subdirección de Ecología y*

Conalep para realizar labores de reforestación. Consultado en:
<https://cozumel.gob.mx/prensa/suman-esfuerzos-subdireccion-de-ecologia-y-conalep-para-realizar-labores-de-reforestacion/>

Ayuntamiento Presidencia Municipal Cozumel. (2015). Programa parcial de desarrollo urbano de la zona 1 de Cozumel, Quintana roo. En *Periódico Oficial del Estado de Quintana Roo*. Quintana Roo, México

Babiker, I. S., Mohamed, M. A. A., & Hiyama, T. (2007). Assessing groundwater quality using GIS. *Water Resources Management*, 21(4), 699–715. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9059-6>

Back, W. (1995). Water management by early people in the Yucatan, Mexico. *Environmental Geology*, 25(4), 239–242. <https://doi.org/10.1007/BF00766752>

Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S., & Palutikof, J. P. (2014). Climate change and water. Technical paper of the intergovernmental panel on climate change. En *Climate Change and Water Resources*. IPCC Secretariat, Genova, 120. <https://doi.org/10.1201/b16969>

Bauer-Gottwein, P., Gondwe, B. R. N., Charvet, G., Marín, L. E., Rebolledo-Vieyra, M., & Merediz-Alonso, G. (2011). Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 19(3), 507–524. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0699-5>

Bautista, F., Bautista, D., & Delgado-Carranza, C. (2009). Calibration of the equations of Hargreaves and Thornthwaite to estimate the potential evapotranspiration in semi-arid and subhumid tropical climates for regional applications. *Atmosfera*, 22(4), 331–348.

Bautista, F., Palacio-Aponte, G., Quintana, P., & Zinck, J. A. (2011). Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from the Peninsula of Yucatan, Mexico. *Geomorphology*, 135(3–4), 308–321. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.02.014>

Becken, S. (2014). Water equity - Contrasting tourism water use with that of the local community. *Water Resources and Industry*, 7–8, 9–22. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2014.09.002>

Beekman, G. B., & Biswas, A. K. (1998). Water Management in Latin America and the Caribbean: Role of IICA. *International Journal of Water Resources Development*, 14(3), 305–313. <https://doi.org/10.1080/07900629849088>

Berg, S. V. (2016). Seven elements affecting governance and performance in the water sector. *Utilities Policy*, 43, 4–13. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2016.04.013>

Bertalanffy, L. Von. (1950). An outline of general system theory. *British Journal for the Philosophy of Science*, 1(2), 134–165. <https://doi.org/10.1093/bjps/1.2.134>

Bertoméu-Sánchez, S., & Serebrisky, T. (2018). *Water and Sanitation in Latin America and the Caribbean: An Update on the State of the Sector*. Salvador Bertoméu-Sánchez and Tomás Serebrisky, Roma, Italia.

Bidhendi, M. E., Pejman, A. H., Bidhendi, G. R. N., Mehrdadi, N., & Karbassi, A. R. (2013). Evaluation of spatial and seasonal variations in surface water quality using multivariate statistical techniques. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 6(3), 467–476. <https://doi.org/10.1007/bf03326086>

Biswas, A. K. (1998). Water Management in Latin America and the Caribbean. *International Journal of Water Resources Development*, 14(3), 293–303.

<https://doi.org/10.1080/07900629849088>

Biswas, A. K. (2008a). Editorial: Integrated water resources management in Latin America. *International Journal of Water Resources Development*, 24(1), 1–4.
<https://doi.org/10.1080/07900620801902918>

Biswas, A. K. (2008b). Integrated water resources management: Is it working? *International Journal of Water Resources Development*, 24(1), 5–22.
<https://doi.org/10.1080/07900620701871718>

Biswas, A. K., Sachdeva, P. K., & Tortajada, C. (2021). *Phnom Penh Water Story* (A. K. Biswas, P. K. Sachdeva, & C. Tortajada (eds.)). Springer Nature Singapore.

Biswas, A. K., & Tortajada, C. (2010). Water supply of Phnom Penh: An example of good governance. *International Journal of Water Resources Development*, 26(2), 157–172.
<https://doi.org/10.1080/07900621003768859>

Biswas, A. K., & Tortajada, C. (2011). Water quality management: An introductory framework. *International Journal of Water Resources Development*, 27(1), 5–11.
<https://doi.org/10.1080/07900627.2010.547979>

Bohensky, E. L. (2006). *A social-ecological systems perspective on water management in South Africa*. PhD. thesis, Faculty of Natural and Agricultural Sciences, University of Pretoria.

Böhringer, C., & Jochem, P. E. P. (2007). Measuring the immeasurable - A survey of sustainability indices. *Ecological Economics*, 63(1), 1–8.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.03.008>

Bonacci, O. (2010). Sinking, losing and underground karst streamflows. En O. Bonacci (Ed.), *Sustainability of the Karst environment* (pp. 9–6). United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

Calò, F., & Parise, M. (2006). Evaluating the human disturbance to karst environments in Southern Italy. *Acta Carsologica*, 35, 47–56. <https://doi.org/10.3986/ac.v35i2-3.227>

CAPA, (Comisión de Agua Potable y Alcantarillado). (n.d.). *Manifestación de Impacto Ambiental, modalidad particular. Ampliación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales San Miguelito, Cozumel, Quintana Roo*. Quintana Roo, México.

CAPA, (Comisión de Agua Potable y Alcantarillado). (2019). *Comisión de agua potable y alcantarillado, cuenta pública 2019*. Quintana Roo, México.

CAPA, (Comisión de Agua Potable y Alcantarillado). (2020). *Tarifas de agua potable del mes de febrero de 2020- Oficio No. CAPA-CC-051-2020*. Quintana Roo, México

CARICOM, (Caribbean Community). (2021). *Annual reports*. Consultado el 17 de Mayo 2021 en: <https://caricom.org/annual-reports/>

Carrillo, de la C. J. L., & Milán, V. S. (2012). *Estudio Geohidrológico del complejo Turístico Isla " La Pasión ", Cozumel*. Presentado en la Convención Nacional Geológica del 12 al 14 de Noviembre en la Ciudad de México.

Carroll, D. (1962). Rainwater as a Chemical Agent of Geologic Processes-A Review. En *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper (1535-G)*, Estados Unidos.

Cashman, A. (2012). Water policy development and governance in the Caribbean: An overview of regional progress. *Water Policy*, 14, 14–30. <https://doi.org/10.2166/wp.2011.122>

- Cashman, A. (2014). Water security and services in the Caribbean. *Water (Switzerland)*, 6(5), 1187–1203. <https://doi.org/10.3390/w6051187>
- Cashman, A. (2017). Why isn't IWRM working in the caribbean? *Water Policy*, 19, 587–600. <https://doi.org/10.2166/wp.2017.100>
- Cashman, A., Nurse, L., & John, C. (2010). Climate Change in the Caribbean : The Water Management Implications. *The Journal of Environment & Development*, 19(1), 42–67. <https://doi.org/10.1177/1070496509347088>
- Castro-Borges, P., & Mendoza-Rangel, J. M. (2010). Influence of climate change on concrete durability in Yucatan peninsula. *Corrosion Engineering Science and Technology*, 45(1), 61–69. <https://doi.org/10.1179/147842209X12489567719662>
- Castro, M., Almeida, J., Ferrer, J., & Diaz, D. (2015). Indicadores de la calidad del agua: evolución y tendencias a nivel global. *Ingeniería Ambiental*, 10(17), 111–124. <https://doi.org/10.16925/in.v9i17.811>
- CCPY, (Consejo de Cuenca de la Península de Yucatán). (2012). *Comité Técnico de aguas subterráneas para la zona metropolitana de Mérida (COTASMEY)*. Mérida, Yucatán.
- CEHI, (Caribbean Environmental Health Institute). (2006). *A Programme for Promoting Rainwater Harvesting in the Caribbean Region*. The United Nations Environment Programme. Castries, Sta. Lucia.
- CEHI, (Caribbean Environmental Health Institute), & GEF. (2007). *Road Map Toward Integrated Water Resources Management Planning for Grenada*. Castries. Gobierno de Granada y United Nations Environment Programme Collaborating Centre for Water and Environment, Sta. Lucia.
- CEMDA, (Centro Mexicano de Derecho Ambiental A.C). (2006). El agua en México: lo que todas y todos debemos saber. En *Medio Ambiente y desarrollo hacia un manejo sustentable del agua (1era ed.)*. Centro Mexicano de Derecho Ambiental. Ciudad de México.
- CERMES, (Centre for Natural Resource Management and Environmental Studies). (2018). *Sustainable water management under climate change in the small islands states of the caribbean (water-access)*. Caribbean Community Climate Change Centre (CCCCC) Centre for Resource Management and Environmental Studies (CERMES) – UWI Cave Hill Caribbean Institute for Meteorology and Hydrology (CIMH) Climate Studies Group Mona – UWI Mona Department of Life Sciences.
- Cervantes-Martínez, A. (2007). El balance hídrico en cuerpos de agua cársticos de la Península de Yucatán. *Teoría y Praxis*, 3(3), 143–152. <https://doi.org/10.22403/uqroomx/typ03/12>
- Cervantes-Martínez, A., Guitiérrez-Aguirre, M. A., & Álvarez Legorreta, T. (2015). Indicadores de calidad del agua en lagunas insulares costeras con influencia turística: Cozumel e Isla Mujeres, Quintana Roo, México. *Teoría y Praxis*, 10(Especial, Marzo 2015), 60–83. <https://doi.org/10.22403/uqroomx/typne2015/03>
- Cervantes-Martínez, A., Guitiérrez-Aguirre, M. A., Delgado-Blas, H., & Ruiz-Ramírez, J. D. (2018). *Especies de zooplancton dulceacuícola de Cozumel (Segunda)*. Universidad de Quintana Roo.
- Cervantes-Martínez, A., Guitiérrez-Aguirre, M. A., Elías-Gutiérrez, M., Arce-Ibarra, A. M., & García-Morales, A. (2018). Aquatic biodiversity in cenotes from the Yucatan Peninsula (Quintana Roo , México). *Teoría y Praxis*, 49–68.

- Cervera, G. L. E. (2007). Indicadores de uso sustentable del agua en Ciudad Juárez, Chihuahua. *Estudios Fronterizos*, 8(16), 9–41.
- Chagoy, R. M. A., Graham, Á., López, M. G. D., & Soberanis, C. V. H. (2017). *Diagnóstico y evaluación de la vulnerabilidad en salud ante el cambio climático del estado de Quintana Roo*. Secretaría de Salud, Servicios Estatales de Salud, Gobierno de Quintana Roo y Universidad de Quintana Roo, Quintana Roo, México.
- Chakraborty, S. (2010). Integrated water resource management: A human ecological perspective. *Ritsumeikan Journal of Asia Pacific Studies*, 27, 153–166.
- Chávez-Costa, C. M., & Collantes, A. (2003). *Turismo en áreas rurales de Cozumel*. Universidad de Quintana Roo, Quintana Roo.
- Chen, W., Chen, C., Li, L., Xing, L., Huang, G., & Wu, C. (2015). Spatiotemporal analysis of extreme hourly precipitation patterns in Hainan Island, South China. *Water (Switzerland)*, 7(5), 2239–2253. <https://doi.org/10.3390/w7052239>
- Chene, J.-M. (2009). Introduction Integrated Water Resources Management : Theory versus practice. *Natural Resources Forum*, 33, 2–5.
- Chuvieco, E. (2012). Religious approaches to water management and environmental conservation. *Water Policy*, 14, 9–20.
- Cokorilo, M., Mladenovic, A., Cuk, M., & Jemcov, I. (2019). The Importance of Detailed Groundwater Monitoring for Underground Structure in Karst (Case Study : HPP. *Water (Switzerland)*, 11(603). <https://doi.org/10.3390/w11030603>
- Cole, S. (2012). A political ecology of water equity and tourism. A Case Study From Bali. *Annals of Tourism Research*, 39(2), 1221–1241. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2012.01.003>
- CONAFOR, (Comisión Nacional Forestal). (2017). *Nueva vida en el manglar*. Comisión Nacional Forestal, Consultado el 20 de Febrero de 2021 en: <https://www.gob.mx/conafor/articulos/nueva-vida-en-el-manglar>
- CONAGUA, (Comisión Nacional del Agua). (2012). *Programa Hídrico Regional Visión 2030 - Región Hidrológico-Administrativa XII Península de Yucatán*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Ciudad de México.
- CONAGUA, (Comisión Nacional del Agua). (2015a). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Isla de Cozumel (2305)*. Estado de Quintana Roo.
- CONAGUA, (Comisión Nacional del Agua). (2015b). *Programa Hídrico Regional 2014-2018 de la región Hidrológico-Administrativa XII Península de Yucatán*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Ciudad de México.
- CONAGUA, (Comisión Nacional del Agua). (2018a). *Atlas del agua en México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales & Comisión Nacional del Agua, Ciudad de México.
- CONAGUA, (Comisión Nacional del Agua). (2018b). *Estadísticas del agua en México*. Secretaría de Ambiente y Recursos Naturales & Comisión Nacional del Agua, Ciudad de México.
- CONAGUA, (Comisión Nacional del Agua). (2020). *Programa Nacional Hídrico 2020-2024 - Resumen*. Secretaría de Ambiente y Recursos Naturales & Comisión Nacional del Agua, Ciudad de México.

- Conservation Ontario. (2010). *Integrated Watershed Management- Water Management Framework*. Conservation Ontario, Ontario, Canadá.
- Coral, Z. E. (2015). *Diagnóstico del estado de implementación del grado de presión hídrico sobre el acuífero de la isla de Cozumel*. Tesis de Maestría Sustentable en Gestión del Turismo, División de Desarrollo Sustentable, Universidad de Quintana Roo, México.
- Córdova, B. G. (2014). *La ciudad y sus actores. La sustentabilidad del agua en Ciudad Juárez*. El Colegio de Chihuahua. Ciudad Juárez, Chihuahua.
- Coronado-Álvarez, L., Guitiérrez-Aguirre, M. A., & Cervantes-Martínez, A. (2011). Water quality in wells from Cozumel island, Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13(2), 233–241.
- Correll, D. L. (1999). Phosphorus : A Rate Limiting Nutrient in Surface Waters. *Poultry Science*, 78, 674–682. <https://doi.org/https://doi.org/10.1093/ps/78.5.674>
- CSF, (Conservación Estratégica). (2017). *Valoración de servicios ambientales del parque nacional arrecifes de Cozumel y área de protección de flora y fauna isla de Cozumel*. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Quintana Roo, México.
- Cuarón, A. D., Martínez-Morales, M. A., McFadden, K. W., Valenzuela, D., & Gompper, M. E. (2004). The status of dwarf carnivores on Cozumel Island, Mexico. *Biodiversity and Conservation*, 13, 317–331. <https://doi.org/10.1023/B:BIOC.0000006501.80472.cc>
- Day, M. (2010). Challenges to sustainability in the Caribbean karst. *Geologia Croatica*, 63(2), 149–154. <https://doi.org/104154/gc.2010.12>
- De la Barreda, B., Metcalfe, S. E., & Boyd, D. S. (2020). Precipitation regionalization, anomalies and drought occurrence in the Yucatan Peninsula, Mexico. *International Journal of Climatology*, 40(10), 4541–4555. <https://doi.org/10.1002/joc.6474>
- Delgado, C., Bautista, F., Lanza, R. O., & Hernández, H. R. (2011). Classification and agroclimatic zoning using the relationship between precipitation and evapotranspiration in the state of Yucatán, Mexico. *Investigaciones Geográficas*, 75, 51–60.
- Deng, Y., Young, C., Fu, X., Song, J., & Peng, Z. R. (2017). The integrated impacts of human activities and rising sea level on the saltwater intrusion in the east coast of the Yucatan Peninsula, Mexico. *Natural Hazards*, 85(2), 1063–1088. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2621-5>
- Deyà-Tortella, B., García, C., Nilsson, W., & Tirado, D. (2017). Analysis of water tariff reform on water consumption in different housing typologies in Calvià (Mallorca). *Water*, 9, 425. <https://doi.org/10.3390/w9060425>
- Deyà-Tortella, B., García, C., Nilsson, W., & Tirado, D. (2016). The effect of the water tariff structures on the water consumption in Mallorcan hotels. *Water Resources Research*, 52(8), 6386–6403.
- Deyà, B., & Tirado, D. (2011). Hotel water consumption at a seasonal mass tourist destination. The case of the island of Mallorca. *Journal of Environmental Management*, 92(10), 2568–2579. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.05.024>
- DGE, (Directorate-General for Environment Comisión Europea). (2015). *The EU Water Framework Directive*. Consultado en: <https://doi.org/978-92-79-36449-5>

- Dinpashoh, Y., Jhajharia, D., Fakheri-Fard, A., Singh, V. P., & Kahya, E. (2011). Trends in reference crop evapotranspiration over Iran. *Journal of Hydrology*, 399(3–4), 422–433. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.01.021>
- Dirección General Adjunta de Oceanografía Hidrografía y Meteorología. (n.d.). *San Miguel de Cozumel Quintana Roo*. Consultado el 23 de Febrero de 2021 en: <http://digaohm.semar.gob.mx/cuestionarios/cnarioCozumel.pdf>.
- Distefano, T., & Kelly, S. (2017). Are we in deep water? Water scarcity and its limits to economic growth. *Ecological Economics*, 142, 130–147. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.019>
- Doerr, A. H., & Hoy, D. R. (1957). Karst landscapes of Cuba, Puerto Rico, and Jamaica. *The Scientific Monthly*, 85(4), 178–187.
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2020a). *ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican*. Ciudad de México, México.
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2020b). *Ley de Aguas Nacionales, 6 de enero de 2020 - Última reforma publicada DOF 06-01-2020*. Ciudad de México, México.
- Durán-Sánchez, A., Álvarez-García, J., & del Río-Rama, M. de la C. (2018). Sustainable water resources management: A bibliometric overview. *Water (Switzerland)*, 10, 1191. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w10091191>
- Eguzki. (2010). Teoría De Sistemas de Niklas Luhmann. *Contrastes*, 15, 301–317.
- Ekwue, E. I. (2010). Management of Water Demand in the Caribbean Region : Current Practices and Future Needs. *The West Indian Journal of Engineering*, 32(1–2), 28–35.
- Emeribe, C., Butu, A., & Laka, S. (2019). Trend Analysis, Cycles and Periodicities in Annual Maximum Daily Rainfall Distributions over Southern Nigeria. *Journal of the Nigerian Association of Mathematical Physics*, 52, 299–312.
- Engstrom, M. D., Schmidt, C. A., Morales, J. C., & Dowler, R. C. (2015). Records of Mammals from Isla Cozumel, Quintana Roo, Mexico. *Southwestern Association of Naturalists*, 34(3), 413–415.
- EPA, (Environmental Protection Agency). (2007). *Nitrites and Nitrates- TEACH Chemical Summary*. Consultado en: <http://www.epa.gov/teach/>
- EPA, (Environmental Protection Agency). (2009). *National Primary Drinking Water Regulations*. Serie EPA Vol. EPA 816-F-. Office of Ground Water and Drinking Water, Estados Unidos.
- EPA, (Environmental Protection Agency). (2021). *Consumer Confidence Reports*. Consultado en línea el 19 de Mayo de 2021 en: [https://ofmpub.epa.gov/apex/safewater/f?p=136:102:::~:](https://ofmpub.epa.gov/apex/safewater/f?p=136:102:::)
- Ercan, B., & Yüce, M. İ. (2017). Trend Analysis of Hydro-Meteorological Variables of Kızıllırmak Basin. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi Cilt*, 6, 333–340. <https://doi.org/10.17100/nevbiltek.323640>
- Eriksson, E. (1952). Composition of Atmospheric Precipitation. *Tellus*, 4(4), 280–303. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v4i4.8813>

Erostate, M., Huneau, F., Garel, E., Ghiotti, S., Vystavna, Y., Garrido, M., & Pasqualini, V. (2020). Groundwater dependent ecosystems in coastal Mediterranean regions: Characterization, challenges and management for their protection. *Water Research*, 115461. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115461>

Escalante, P. (1996). *Tipos de vegetación de la Isla de Cozumel, Quintana Roo: Vol. Escala 1:5*. Extraído del proyecto B010 Avifauna de la Isla de Cozumel. Instituto de Biología. Departamento de Zoología, UNAM. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad y Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

Escobar-Briones, E., Camacho, M. E., & Alcocer, J. (1997). Calliasmata nohochi, new species (Decapoda: Caridea: Hippolytidae), from anchialine cave systems in continental Quintana Roo, Mexico. *Journal of Crustacean Biology*, 17(4), 733–744. <https://doi.org/10.2307/1549376>

Essex, S., Kent, M., & Newnham, R. (2004). Tourism development in mallorca: Is water supply a constraint? *Journal of Sustainable Tourism*, 12(1), 4–28. <https://doi.org/10.1080/09669580408667222>

Excélsior. (2017). *Multa Profepa a la Administración Portuaria Integral*. La Pancarta de Quintana Roo, consultado el 19 de Febrero del 2021 en: <https://lapancartadequintanaroo.com.mx/multa-profepa-a-la-administracion-portuaria-integral/>

FACETS, (Floridan Aquifer Collaborative Engagement for Sustainability). (2021). *FACETS Objectives*. Consultado en línea el 23 de Febrero del 2021 en: <http://floridanwater.org/about/>

Falkenmark, M., Lundqvist, J., & Widstrand, C. (1989). Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches Aspects of vulnerability in semi-arid development. *Natural Resources Forum*, 258-267.

Falkland, A. (1992). *Small tropical island - water resources of paradises lost*. UNESCO, París, Francia.

Falkland, A. (1993). Hydrology and water management on small tropical islands. *Hydrology of Warm Humid Regions.*, 126, 263–303.

FAO, (Food and Agriculture Organization). (2015). *AQUASTAT Country Profile – Barbados*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Roma, Italia.

Faust, B. B. (2001). Maya environmental successes and failures in the Yucatan Peninsula. *Environmental Science and Policy*, 4(4–5), 153–169. [https://doi.org/10.1016/S1462-9011\(01\)00026-0](https://doi.org/10.1016/S1462-9011(01)00026-0)

Foster, T., Brozović, N., & Butler, A. P. (2015). Analysis of the impacts of well yield and groundwater depth on irrigated agriculture. *Journal of Hydrology*, 523, 86–96. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.032>

Foster, T., Brozović, N., & Speir, C. (2017). The buffer value of groundwater when well yield is limited. *Journal of Hydrology*, 547, 638–649. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.034>

FPMC, (Fundación de Parques y Museos de Cozumel). (2019). *La FPMC involucra a la comunidad estudiantil en la reforestación de mangle en Punta Sur*. Consultado en línea el 20 de Febrero del 2021 en: <http://cgc.qroo.gob.mx/la-fPMC-involucra-a-la-comunidad-estudiantil-en-reforestacion-de-mangle-en-punta-sur/>

FPMC, (Fundación de Parques y Museos de Cozumel). (2021). *Centro de Conservación y Educación Ambiental*. Consultado en: <http://www.fPMC.qroo.gob.mx/centro-de-conservacion-y->

educacion-ambiental/

Frausto, M. O., Guitiérrez-Aguirre, M. A., Cervantes-Martínez, A., Mejía-Ortíz, L. M., Yañez, G., Koch, H. C., Vázquez, A. B., Hernández-Flores, G., Colín Olivares, O., Salazar, A. S., & Giese, S. (2018). *Estudio hidrológico de la isla de Cozumel*. Universidad de Quintana Roo & Ayuntamiento de Cozumel, Cozumel, México.

Frausto, M. O., Mattes, L., Ihl, T., Cervantes-Martínez, A., & Giese, S. (2008). Groundwater Quality Monitoring on Northeast Yucatan Peninsula, Mexico. *20th Salt Water Intrusion Meeting*, 80–83.

Frausto, M. O., Zapi-salazar, N. A., & Colin-Olivares, O. (2019). Identification of Karst Forms Using LiDAR Technology: Cozumel Island, Mexico. En R. Abdalla (Ed.), *Trends in Geomatics, An Earth Science Perspective*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.79196>

Fuentes-Bargues, J. L. (2014). Analysis of the process of environmental impact assessment for seawater desalination plants in Spain. *Desalination*, 347, 166–174. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.05.032>

Gallopín, G. (2003). *Sostenibilidad y desarrollo sostenible: un enfoque sistémico*. División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos, CEPAL, Naciones Unidas. Santiago de Chile, Chile.

Gamble, D. . (2004). Water resource development on small carbonate islands: solutions offered by the hydrologic landscape concept. En D. Janelle, B. Warf, K. Hansen, B. Sprague, & G. Zavala (Eds.), *WorldMinds: Geographical Perspectives on 100 Problems* (pp. 503–507). Springer Science+Business Media Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2352-1>

Garmendia, C. X. (2019). *Saneamiento de las aguas residuales*. Centro de Estudios de Derecho e Investigaciones Parlamentarias & Cámara de Diputados LXIV legislatura, Ciudad de México.

Garza, R. V., & Ojeda, T. R. (2020). *IPN researchers discovered five new species of fungi in Cozumel*. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas (ENCB), Ciudad de México.

Gikas, P., & Tchobanoglous, G. (2009). Sustainable use of water in the Aegean Islands. *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2601–2611. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.01.020>

Giordano, M., & Shah, T. (2014). Non-Integrated water resources management. En P. Martínez-Santos, M. Aldaya, & R. Llamas (Eds.), *Integrated Water Resources Management in the 21st Century: Revisiting the paradigm* (pp. 37–46). CRC Press/Balkema, Estados Unidos.

Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M. F. P., & van Beek, L. P. H. (2012). Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, 488(7410), 197–200. <https://doi.org/10.1038/nature11295>

Gómez, C. J. J., Bernal Muñoz, R., & Hernández Rodríguez, M. D. L. (2015). Calidad del agua para riego en la agricultura protegida en Tlaxcala. *Ingeniería*, 19(1), 39–50.

Gompper, M. E., Petrites, A. E., & Lyman, R. L. (2006). Cozumel Island fox (*Urocyon* sp.) dwarfism and possible divergence history based on subfossil bones. *Journal of Zoology*, 270(1), 72–77. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.2006.00119.x>

Gonçalves, A. M., & Alpuim, T. (2011). Water quality monitoring using cluster analysis and linear models. *Environmetrics*, 22, 933–945. <https://doi.org/10.1002/env.1112>

- Gonneea, M. E., Charette, M. A., Liu, Q., Herrera-Silveira, J. A., & Morales-Ojeda, S. M. (2014). Trace element geochemistry of groundwater in a karst subterranean estuary (Yucatan Peninsula, Mexico). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *132*, 31–49. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.01.037>
- González, D. A., Macías, A. R., & Sepúlveda, M. (2017). Cruise tourism as factor of social exclusion on Cozumel island's residents' perception. *Cultur: Revista de Cultura e Turismo*, *11(2)*, 29–53.
- González, P. D. M., Martín, M. J. M., Guaita, M. J. M., & Sáez-Fernández, F. J. (2020). An analysis of the cost of water supply linked to the tourism industry. An application to the case of the Island of Ibiza in Spain. *Water (Switzerland)*, *12(7)*. <https://doi.org/10.3390/w12072006>
- Gössling, S. (2015). New performance indicators for water management in tourism. *Tourism Management*, *46*, 233–244. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2014.06.018>
- Gössling, S., Peeters, P., Hall, C. M., Ceron, J.-P., Dubois, G., Lehmann, L. V., & Scott, D. (2012). Tourism and water use: Supply, demand, and security. An international review. *Tourism Management*, *33*, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2011.03.015>
- Graham, W., Adams, D., Athearn, K., Bartels, W., Barrett, C., Borisova, T., Rooij, R., Carton de Grammont, P., Dukes, M., Hochmuth, R., Kaplan, D., Love, J., Monroe, M., Schlatter, K., Susaeta, A., Cowie, G., Masters, M., Rowles, K., Kalin, L., ... Vellidis, G. (2020). *2020 Annual Report Executive Summary (Issue 2017)*. Floridan Aquifer Collaborative Engagement for Sustainability, Estados Unidos.
- Green, T. R., Taniguchi, M., Kooi, H., Gurdak, J. J., Allen, D. M., Hiscock, K., Treidel, H., & Aureli, A. (2011). Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. *Journal of Hydrology*, *405(3–4)*, 532–560. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.002>
- Grigg, N. S. (2008). Integrated water resources management : balancing views and improving practice. *Water International*, *33(3)*, 279–292. <https://doi.org/10.1080/02508060802272820>
- Guerrero, H. (2019). Water Policy in Mexico. En H. Guerrero (Ed.), *Global Issues in Water Policy (Vol. 20)*. Springer International Publishing AG, Cham, Suiza.
- Gutiérrez-Aguirre, M. A., Cervantes-Martínez, A., & Coronado-Álvarez, L. (2008). Limnology of groundwater exposures with urban influence in Cozumel island, Mexico. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, *30(2)*, 493–496.
- Gutiérrez-Aguirre, M. A., Cervantes-Martínez, A., Frausto, M. O., Uhu-Yam, W. D., Delgado-Blas, V. H., & Ruiz-Ramírez, J. D. (2018). Revisión de las especies endémicas de poliquetos, crustáceos y peces del Acuífero Norte de Quintana Roo, México. *Teoría y Praxis*, *25*, 90–114.
- Gumbo, B., & Zaag, P. Van Der. (2012). *Principles of Integrated Water Resources Management (IWRM)*. Presentado en Southern Africa Youth Forum del 24 al 25 de Septiembre, Harare, Zimbabwe.
- Gutiérrez, A. J., Rubio, C., Caballero, J. M., & Hardisson, A. (2014). Nitrites. *Encyclopedia of Toxicology: Third Edition*, *3(3)*, 532–535. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.00522-4>
- Gutiérrez, F., Parise, M., De Waele, J., & Jourde, H. (2014). A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. *Earth-Science Reviews*, *138*, 61–88. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.002>

GWP, (Global Water Partnership). (2000). *Integrated Water Resources Management, Technical Advisory Committee (TAC) Background Paper No.4* (First edit, Issue 4). Asociación Mundial para el Agua, Suiza.

GWP, (Global Water Partnership). (2014). Technical Focus Paper - Integrated water resources management in the Caribbean: The challenges facing Small Island Developing States. Global Water Partnership, Suiza.

GWPC, (Global Water Partnership Caribbean). (2015). Sustainability of Integrated Water Resources Management Initiatives in the Caribbean. En *Sustainability of Integrated Water Resources Management*. Global Water Partnership-Caribbean, Granada.

Hadjikakou, M., Chenoweth, J., & Miller, G. (2013). Estimating the direct and indirect water use of tourism in the eastern Mediterranean. *Journal of Environmental Management*, *114*, 548–556. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.11.002>

Hall, T. C., Sealy, A. M., Stephenson, T. S., Kusunoki, S., Taylor, M. A., Chen, A. A., & Kitoh, A. (2013). Future climate of the Caribbean from a super-high-resolution atmospheric general circulation model. *Theoretical and Applied Climatology*, *113*(1–2), 271–287. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0779-7>

Hammond, D. (2003). *The Science of Synthesis*. University Press of Colorado, Estados Unidos.

Hartmann, A., Gleeson, T., Rosolem, R., Pianosi, F., Wada, Y., & Wagener, T. (2015). A large-scale simulation model to assess karstic groundwater recharge over Europe and the Mediterranean. *Geoscientific Model Development*, *8*, 1729–1746. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1729-2015>

Hashimoto, T., Stedinger, J. R., & Loucks, D. P. (1982). Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria. *Water Resources Research*, *18*(1), 14–20. <https://doi.org/10.1029/WR018i001p00014>

Hassing, J., Ipsen, N., Clausen, T. J., Larsen, H., & Lindgaard-Jørgensen, P. (2009). *Integrated Water Resources Management in Action The United Nations World Water Development Report 3 Water in a Changing World*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, París, Francia.

Heartsill, T. (2012). Freshwater resources in the insular caribbean: an environmental perspective. *Caribbean Studies*, *40*(2), 63–93.

Helsel, D. R., & Hirsch, R. M. (2002). *Statistical methods in water resources. En Book 4, Hydrologic Analysis and Interpretation*. U.S. Geological Survey, Estados Unidos.

Hernández-Flores, G., Gutiérrez-Aguirre, M. A., & Cervantes-Martínez, A. (2020). Hacia un manejo integral del recurso hídrico en isla Cozumel, Quintana Roo. *Impluvium*, *10*, 34–40.

Hernández-Terrones, L., Null, K. A., Ortega-Camacho, D., & Paytan, A. (2015). Water quality assessment in the Mexican Caribbean: Impacts on the coastal ecosystem. *Continental Shelf Research*, *102*, 62–72. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.04.015>

Herrera-Silveira, J. A., Comin, F. A., Aranda-Cirerol, N., Troccoli, L., & Capurro, L. (2005). Coastal water quality assessment in the Yucatan Peninsula: Management implications. *Ocean and Coastal Management*, *47*(11-12), 625–639. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2004.12.005>

Hileman, J., Hicks, P., & Jones, R. (2015). International Journal of Water An alternative

framework for analysing and managing conflicts in integrated water resources management (IWRM): linking theory and practice. *International Journal of Water Resources Development*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1080/07900627.2015.1076719>

Hummel, D., Jahn, T., Keil, F., Liehr, S., & Stieß, I. (2017). Social ecology as critical, transdisciplinary science-conceptualizing, analyzing and shaping societal relations to nature. *Sustainability (Switzerland)*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/su9071050>

Hussain, F., Nabi, G., & Waseem Boota, M. (2015). Rainfall trend analysis by using the Mann-Kendall test & Sen's slope estimates: a case study of District Chakwal Rain Gauge, Barani Area, Northern Punjab Province, Pakistan. *Science International (Lahore)*, 27(4), 3159-3165.

Ihl, T., & Frausto, M. O. (2014). El cambio climático y las huracanes en la península de Yucatán. En Universidad de Quintana Roo & REDESCLIM (Eds.), *El cambio climático y las huracanes en la península de Yucatán* (Primera ed.). Universidad de Quintana Roo, 42-49.

INEGI, (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2002). *Estudio hidrológico del estado de Quintana Roo*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Aguascalientes, México.

INEGI, (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2015). *Panorama sociodemográfico de Quintana Roo 2015/ Encuesta Intercensal* (2015th ed.). Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Aguascalientes, México.

INEGI, (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Quintana Roo 2017*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Aguascalientes, México.

Infomex. (2015). *Respuesta a solicitud de información folio 00113015 - Oficio No. SGP/UTAIPE/DG/CAS/0542/VI/2015*. Comisión De Agua Potable y Alcantarillado. Quintana Roo, México.

Infomex. (2018a). *Respuesta a la solicitud de información folio 0026618 - Oficio No. CAPA/CJ-DJ-ET/044/2018*. Comisión De Agua Potable y Alcantarillado. Quintana Roo, México.

Infomex. (2018b). *Respuesta a la solicitud de información folio 00625518 - Oficio N. CAPA/CJ-DJ-ET/037/2018*. Quintana Roo, México.

Infomex. (2018c). *Respuesta a la solicitud de información folio 00625618 - Oficio No. CAPA/CJ-DJ-ET/035/2018*. Comisión De Agua Potable y Alcantarillado. Quintana Roo, México.

Infomex. (2018d). *Respuesta a la solicitud de información folio 00625818 - No. Oficio DDUE/SE/2018/402*. Comisión De Agua Potable y Alcantarillado. Quintana Roo, México.

Infomex. (2018e). *Respuesta a la solicitud de información folio 00626118 - Oficio No. CAPA/CJ-DJ-ET/039/2018*. Comisión De Agua Potable y Alcantarillado. Quintana Roo, México.

Infomex. (2018f). *Respuesta a la solicitud de información folio 00626418 - Oficio No. CAPA/CJ-DJ-ET/038/2018*. Comisión De Agua Potable y Alcantarillado. Quintana Roo, México.

Infomex. (2018g). *Respuesta a la solicitud de información folio 00626418 - Oficio No. CAPA/CJ-DJ-ET/042/2018*. Comisión De Agua Potable y Alcantarillado. Quintana Roo,

México.

Infomex. (2018h). *Respuesta a la solicitud de información folio 00772818 - Oficio No. CAPA/CJ-DJ-ET/064/2018*. Comisión De Agua Potable y Alcantarillado. Quintana Roo, México.

Infomex. (2018i). *Respuesta a la solicitud de información folio 00772918 - Oficio No. CAPA/CJ-DJ-ET/065/2018*. Comisión De Agua Potable y Alcantarillado. Quintana Roo, México.

Infomex. (2018j). *Respuesta a la solicitud de información folio 00773118 - Oficio No. CAPA/CJ-DJ-ET/066/2018*. Comisión De Agua Potable y Alcantarillado. Quintana Roo, México.

Infomex. (2018k). *Respuesta a la solicitud de información folio 00773318 - Oficio No. CAPA/CJ-DJ-ET/067/2018*. Comisión De Agua Potable y Alcantarillado. Quintana Roo, México.

Infomex. (2018l). *Respuesta a la solicitud de información folio 00773418 - Oficio No. CAPA/CJ-DJ-ET/069/2018*. Comisión De Agua Potable y Alcantarillado. Quintana Roo, México.

Infomex. (2018m). *Respuesta a la solicitud de información Oficio 00625918 - Oficio No. DDUE/SE/2018/401*. Comisión De Agua Potable y Alcantarillado. Quintana Roo, México.

Infomex. (2019a). *Respuesta a la solicitud de información folio 00455519 - Oficio No. CAPA/CJ-DJ-ET/131/2019*. Comisión De Agua Potable y Alcantarillado. Quintana Roo, México.

Infomex. (2019b). *Respuesta a la solicitud de información folio 00455619 - Oficio No. CAPA/CJ-DJ-ET/132/2019*. Comisión De Agua Potable y Alcantarillado. Quintana Roo, México.

Infomex. (2019c). *Respuesta a la solicitud de información folio 00455719 - Oficio No. CAPA/CJ-DJ-ET/133/2019*. Comisión De Agua Potable y Alcantarillado. Quintana Roo, México.

Infomex. (2019d). *Respuesta a la solicitud de información folio 00455819 - Oficio No. CAPA/CJ-DJ-ET/131/2019*. Comisión De Agua Potable y Alcantarillado. Quintana Roo, México.

Infomex. (2019e). *Respuesta a la solicitud de información folio 00455919 - Oficio No. CAPA/CJ-DJ-ET/135/2019*. Comisión De Agua Potable y Alcantarillado. Quintana Roo, México.

Infomex. (2019f). *Respuesta a la solicitud de información folio 00590019 - Oficio No. CAPA/CJ-DJ-ET/0158/2019*. CAPA. Comisión De Agua Potable y Alcantarillado. Quintana Roo, México.

Infomex. (2019g). *Respuesta a la solicitud de información folio 01113719 - Oficio No. CAPA/CJ-DJ-ET/190/2019*. Comisión De Agua Potable y Alcantarillado. Quintana Roo, México.

Infomex. (2019h). *Respuesta a la solicitud de información folio 01114019 - Oficio No. CAPA/CJ-DJ-ET/191/2019*. Comisión De Agua Potable y Alcantarillado. Quintana Roo, México.

- Infomex. (2019i). *Respuesta a la solicitud de información folio 01140119 - Oficio No. CAPA/CJ-DJ-ET/198/2019*. Comisión De Agua Potable y Alcantarillado. Quintana Roo, México.
- Infomex. (2019j). *Respuesta a la solicitud de información folio 01140219 - Oficio No. CAPA/CJ-DJ-ET/199/2019*. Comisión De Agua Potable y Alcantarillado. Quintana Roo, México.
- Infomex. (2019k). *Respuesta a la solicitud de información folio 01140319 - Oficio No. CAPA/CJ-DJ-ET/200/2019*. Comisión De Agua Potable y Alcantarillado. Quintana Roo, México.
- Infomex. (2019l). *Respuesta a la solicitud de información folio 01140419 - Oficio No. CAPA/CJ-DJ-ET/201/2019*. Comisión De Agua Potable y Alcantarillado. Quintana Roo, México.
- Infomex. (2020a). *Respuesta a la solicitud de información folio 00169320 - Oficio No. CAPA/CJ-DJ-ET/024/2020*. Comisión De Agua Potable y Alcantarillado. Quintana Roo, México.
- Infomex. (2020b). *Respuesta a la solicitud de información folio 00169420 - Oficio No. CAPA/CJ-DJ-ET/025/2020*. Comisión De Agua Potable y Alcantarillado. Quintana Roo, México.
- Infomex. (2020c). *Respuesta a la solicitud de información folio 00169520 - Oficio No. CAPA/CJ-DJ-ET/026/2020*. Comisión De Agua Potable y Alcantarillado. Quintana Roo, México.
- Infomex. (2020d). *Respuesta a la solicitud de información folio 00169620 - Oficio No. CAPA/CJ-DJ-ET/027/2020*. Comisión De Agua Potable y Alcantarillado. Quintana Roo, México.
- Infomex. (2020e). *Respuesta a la solicitud de información folio 00169720 - Oficio No. CAPA/CJ-DJ-ET/028/2020*. Comisión De Agua Potable y Alcantarillado. Quintana Roo, México.
- Instituto Nacional de Ecología. (1998). *Programa de Manejo Parque Marino Nacional Arrecifes de Cozumel, Quintana Roo*. Instituto Nacional de Ecología, México.
- Isaac-Márquez, A. P., Lezama-Dávila, C. M., Ku-Pech, P. P., & Tamay-Segovia, P. (1994). Calidad sanitaria de los suministros de agua para consumo humano en Campeche. *Salud Pública de Mexico*, 36(6), 655–661.
- Iwaniszewski, S. (2016). El tiempo y la Luna en la cultura maya el caso de Cozumel.pdf. En *El papel de la arqueoastronomía en el mundo maya: el caso de la isla de Cozumel*. UNESCO, París, Francia.
- Jain, S. K., & Singh, V. P. (2010). Journal of Comparative Social Welfare Water crisis. *Journal of Comparative Social Welfare*, 26(2–3), 215–237.
- Jaiswal, R. K., Lohani, A. K., & Tiwari, H. L. (2015). Statistical Analysis for Change Detection and Trend Assessment in Climatological Parameters. *Environmental Processes*, 2, 729–749. <https://doi.org/10.1007/s40710-015-0105-3>
- Jamal, T., Camargo, B., Sandlin, J., & Segrado, P. R. G. (2010). Tourism and cultural sustainability: Towards an eco-cultural justice for place and people. *Tourism Recreation*

Research, 35(3), 269–279. <https://doi.org/10.1080/02508281.2010.11081643>

Jeffrey, P., & Gearey, M. (2006). Integrated water resources management: Lost on the road from ambition to realisation? *Water Science and Technology*, 53(1), 1–8. <https://doi.org/10.2166/wst.2006.001>

Jiang, G., Wightman, E., Donose, B. C., Yuan, Z., Bond, P. L., & Keller, J. (2013). The role of iron in sulfide induced corrosion of sewer concrete. *Water Research*, 49, 166–174. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.11.007>

Jiménez, C. B., Torregrosa y Armentia, M., & Aboites Aguilar, L. (2010). *El agua en México: causas y encauses* (B. Jiménez Cisneros, M. Torregrosa y Armentia, & L. Aboites Aguilar (eds.)). Academia Mexicana de Ciencias, Ciudad de México.

JMP, WHO, (World Health Organization), & UNICEF, (United Nations Children’s Fund). (2015). *Post 2015 WASH targets and indicators*. World Health Organization, Ginebra, Suiza.

Jonsson, A. (2005). Public participation in water resources management: Stakeholder voices on degree, scale, potential, and methods in future water management. *Ambio*, 34(7), 495–500. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-34.7.495>

Juwana, I., Muttill, N., & Perera, B. J. C. (2012). Indicator-based water sustainability assessment - A review. *Science of the Total Environment*, 438, 357–371. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.093>

Juwana, I., Muttill, N., & Perera, B. J. C. (2016). Uncertainty and sensitivity analysis of West Java Water Sustainability Index - A case study on Citarum catchment in Indonesia. *Ecological Indicators*, 61, 170–178. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.08.034>

Kačaroğlu, F. (1999). Review of groundwater pollution and protection in karst areas. *Water, Air, and Soil Pollution*, 113, 337–356.

Kadi, M. A. (2014). Integrated Water Resources Management (IWRM): The international experience. En P. Martínez-Santos, M. Aldaya, & R. Llamas (Eds.), *Integrated Water Resources Management in the 21st Century: Revisiting the paradigm* (pp. 3–15). CRC Press/Balkema, Estados Unidos.

Kang, J., Grable, K., Hustvedt, G., & Ahn, M. (2017). Sustainable water consumption: The perspective of Hispanic consumers. *Journal of Environmental Psychology*, 50, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2017.02.005>

Kennedy, K., Simonovic, S., Tejada-guibert, A., Doria, M. D. F., & Martin, J. L. (2009). *IWRM Implementation in Basins, Sub-basins and Aquifers: State of the Art Review*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, París, Francia.

Kent, M., Newnham, R., & Essex, S. (2002). Tourism and sustainable water supply in Mallorca: A geographical analysis. *Applied Geography*, 22, 351–374. [https://doi.org/10.1016/S0143-6228\(02\)00050-4](https://doi.org/10.1016/S0143-6228(02)00050-4)

Koch, C., Frausto, M. O., Giese, S., Schirmer, M., & Steenbeck, T. (2016). Impact on groundwater of a karstic aquifer in the informal settlement “Las Fincas” on Cozumel Island, Mexico. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 203, 147–158. <https://doi.org/10.2495/eid160141>

Koch, Frausto, M. O., Giese, S., Schirmer, M., Raabe, D., Geiß, S., & Münch, U. (2017). Pharmaceuticals in the groundwater of the informal settlement “las fincas” on Cozumel Island,

- Mexico. *WIT Transactions on the Built Environment*, 170, 193–202.
<https://doi.org/10.2495/CC170191>
- Koudstaal, R., Rijsberman, F., & Savenije, H. H. G. (1992). Water and sustainable development. En *Keynote papers prepared for the international conference on Water and The Environment*. ICEW Secretariat, World Meteorological Organization, Ginebra, Suiza.
- Kresh, J. (2006). Integrative Systems View of Life: Perspectives from General Systems Thinking. En K. J. Y. Deisboeck T.S. (Ed.), *Complex Systems Science in Biomedicine. Topics in Biomedical Engineering International Book Series*. (pp. 3–29). Springer, Berlín, Alemania.
- Labuschagne, C., Brent, A. C., & Van Erck, R. P. G. (2005). Assessing the sustainability performances of industries. *Journal of Cleaner Production*, 13(4), 373–385.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2003.10.007>
- LaVanchy, G. T. (2017). When wells run dry: Water and tourism in Nicaragua. *Annals of Tourism Research*, 64, 37–50. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2017.02.006>
- Leal-Bautista, R. M., Hernández-Zárate, G., Jaime M, N. A., Cuevas R, G., & Oliman, G. V. (2011). Pathogens and pharmaceuticals pollutants as indicators of contamination at the northeastern aquifer of Quintana Roo. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13(2), 211–219.
- Leal-Bautista, R. M., Lenczewski, M., Morgan, C., Gahala, A., & Mclain, J. E. (2013). Assessing Fecal Contamination in Groundwater from the Tulum Region, Quintana Roo, Mexico. *Journal of Environmental Protection*, 4, 1272–1279.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4236/jep.2013.411148>
- Len, L. M., & Parise, M. (2009). Managing environmental problems in Cuban karstic aquifers. *Environmental Geology*, 58, 275–283. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1612-6>
- Lesser, H., Azpeitia, J., & Lesser, J. (1978). Geohidrología de la isla de Cozumel, Q. Roo. *Recursos Hidráulicos*, 7(1), 32–49.
- Liehr, S., Röhrig, J., Mehring, M., & Kluge, T. (2017). How the social-ecological systems concept can guide transdisciplinary research and implementation: Addressing water challenges in central northern Namibia. *Sustainability*, 9, 1–19. <https://doi.org/10.3390/su9071109>
- Long, K., & Pijanowski, B. C. (2017). Is there a relationship between water scarcity and water use efficiency in China? A national decadal assessment across spatial scales. *Land Use Policy*, 69(October), 502–511. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.09.055>
- Lopez-Maldonado, Y., & Berkes, F. (2017). Restoring the environment, revitalizing the culture: Cenote conservation in yucatan, Mexico. *Ecology and Society*, 22(4).
<https://doi.org/10.5751/ES-09648-220407>
- López-Morales, C., & Duchin, F. (2011). Policies and technologies for a sustainable use of water in Mexico: A scenario analysis. *Economic Systems Research*, 23(4), 387–407.
<https://doi.org/10.1080/09535314.2011.635138>
- López, C. A. (2017). *El agua en Mexico. Actores, sectores y paradigmas para una transformación social-ecológica* (C. Denzin, F. Taboada, & R. Pacheco-Vega (eds.)). Friedrich-Ebert-Stiftung, Ciudad de México.
- Loucks, D. P., & Van Beek, E. (2017). *Water resource systems planning and analysis. An introduction to methods, models and applications* (D. P. Loucks & E. Van Beek (eds.)).

Deltares y UNESCO-IHE, París, Francia.

Lutz, A., Thomas, J. M., Pohl, G., Keita, M., & McKay, W. A. (2009). Sustainability of groundwater in Mali, West Africa. *Environmental Geology*, 58, 1441–1450. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1646-9>

Machkour-M'Rabet, S., Vilchis-Nestor, C. A., Barriga-Sosa, I. de los A., Legal, L., & Hénaut, Y. (2017). A molecular approach to understand the riddle of the invasive success of the tarantula, *Brachypelma vagans*, on Cozumel Island, Mexico. *Biochemical Systematics and Ecology*, 70, 260–267. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2016.12.013>

Martínez-Morales, M. A., Cruz, P. C., & Cuarón, A. D. (2009). Predicted population trends for Cozumel Curassows (*Crax rubra grisea*): Empirical evidence and predictive models in the face of climate change. *Journal of Field Ornithology*, 80(4), 317–327. <https://doi.org/10.1111/j.1557-9263.2009.00237.x>

Martínez-Santos, P. (2014). Integrated Water Resources Management in the 21st Century: Revisiting the paradigm. En P. Martínez-Santos, M. Aldaya, & R. Llamas (Eds.), *Integrated Water Resources Management in the 21st Century: Revisiting the paradigm*. CRC Press/Balkema, Florida, Estados Unidos.

Martínez-Santos, P., Aldaya, M., & Llamas, R. (2014). Integrated water resources management: state of the art and the way forward. En P. Martínez-Santos, M. Aldaya, & R. Llamas (Eds.), *Integrated Water Resources Management in the 21st Century: Revisiting the paradigm* (pp. 17–36). CRC Press/Balkema, Florida, Estados Unidos.

Martínez. (2006). Enfoque Sistémico En La Investigación De Cuencas Hidrograficas. *Visión de Futuro*, 5(1).

Martínez, C., & Chávez-Costa, A. C. (2003). *Turismo en áreas rurales de Cozumel - diagnóstico preliminar*.

Martínez, M. Á., Cuarón, A. D., Valenzuela, D., Vázquez, E., & Vázquez, L. B. (2018, October). Isla Cozumel, la biodiversidad ante el Antropoceno. *Conacyt - | La Crónica de Hoy*, Consultado en: <http://www.cronica.com.mx/notas/2018/1097884.html>

Matheny, R. T. (1971). Modern Chultun Construction in Western Campeche, Mexico. *American Antiquity*, 36(4), 473–475.

Matthes, L. (2008). Analysis and evaluation of ground and surface water quality and groundwater flow in the northern aquifer of Quintana Roo, Mexico. En A. (comps.). Gutiérrez-Aguirre, M.A. y Cervantes-Martínez (Ed.), *Estudio geohidrológico del norte de Quintana Roo, México*. CONACYT, FOMIX (CONACYT y Gobierno del Estado de Quintana Roo) y la Universidad de Quintana Roo.

Mayer, P. W., DeOreo, W. B., Opitz, E. M., Kiefer, J. C., Davis, W. Y., Dziegielewski, B., & Nelson, J. O. (1999). *Residential End Uses of Water Executive Summary*. AWWA Research Foundation and American Water Works Association.

McCormack, T., Gill, L. W., Naughton, O., & Johnston, P. M. (2014). Quantification of submarine/intertidal groundwater discharge and nutrient loading from a lowland karst catchment. *Journal of Hydrology*, 519(PB), 2318–2330. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.086>

Mcginnis, M., & Ostrom, E. (2012). SES Framework: Initial changes and continuing challenges. *Ecology and Society*, 19(2), 1–28. <https://doi.org/10.5751/ES-06387-190230>

- Meade, B., & Pringle, J. (2001). Environmental Management Systems for Caribbean Hotels and Resorts. *Journal of Quality Assurance in Hospitality & Tourism*, 2(3-4), 149-159. <https://doi.org/10.1300/J162v02n03>
- Medici, G., Baják, P., West, L. J., Chapman, P. J., & Banwart, S. A. (2020). DOC and nitrate fluxes from farmland; impact on a dolostone aquifer KCZ. *Journal of Hydrology*, 595, 125658. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125658>
- Medici, G., West, L. J., & Banwart, S. A. (2019). Groundwater flow velocities in a fractured carbonate aquifer-type: Implications for contaminant transport. *Journal of Contaminant Hydrology*, 222, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2019.02.001>
- Medina-Moreno, S. A., Jiménez-González, A., Gutiérrez-Rojas, M., & Lizardi-Jiménez, M. A. (2014). Hydrocarbon Pollution Studies of Underwater Sinkholes Along Quintana Roo As a Function of Tourism Development in the Mexican Caribbean. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 13(2), 509–516.
- Mekonnen, M., & Hoekstra, Y. A. (2016). Four Billion People Facing Severe Water Scarcity. *American Association for the Advancement of Science*, 2, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2014.09.014>
- Metcalf, C. D., Beddows, P. A., Bouchot, G. G., Metcalfe, T. L., Li, H., & Van Lavieren, H. (2011). Contaminants in the coastal karst aquifer system along the Caribbean coast of the Yucatan Peninsula, Mexico. *Environmental Pollution*, 159(4), 991–997. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.11.031>
- Modaresi, R. A., Khalili, D., Kamgar-Haghighi, A. A., Zand-Parsa, S., & Banimahd, S. A. (2016). Assessment of seasonal characteristics of streamflow droughts under semiarid conditions. *Natural Hazards*, 82(3), 1541–1564. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2256-6>
- Molinos-Senante, M., & Donoso, G. (2016). Water scarcity and affordability in urban water pricing: A case study of Chile. *Utilities Policy*, 43, 107–116. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jup.2016.04.014>
- Molle, F. (2008). Nirvana concepts, narratives and policy models: Insights from the water sector. *Water Alternatives*, 1(1), 131–156.
- Mollinga, P. P. (2006). *Integrated Water Resources Management . Global Theory , Emerging Practice and Local Needs IWRM in South Asia : A concept looking for a constituency.*
- Montoya, M. P. N. (2005). ¿Qué es el estado del arte? *Ciencia y Tecnología Para La Salud Visual y Ocular*, 3(5), 73–75. <https://doi.org/https://doi.org/10.19052/sv.1666>
- Moreno-Gómez, M., Martínez-Salvador, C., Ahmed-Walid, M., Liedl, R., Stefan, C., & Pacheco, Á. J. (2019). First Steps into an Integrated Karst Aquifer Vulnerability Approach (IKAV). Intrinsic Groundwater Vulnerability Analysis of the Yucatan Karst, Mexico. *Water*, 11, 1610.
- Murray, S., & Larry, S. (2009). *Estadística* (4a edición). Mc Graw-Hill, Nueva York, Estados Unidos.
- Neeti, N., Rogan, J., Christman, Z., Eastman, J. R., Millones, M., Schneider, L., Nickl, E., Schmoock, B., Turner, B. L., & Ghimire, B. (2012). Mapping seasonal trends in vegetation using AVHRR-NDVI time series in the Yucatán Peninsula, Mexico. *Remote Sensing Letters*, 3(5), 433–442. <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.616238>

- Ness, B., Urbel-Piirsalu, E., Anderberg, S., & Olsson, L. (2007). Categorising tools for sustainability assessment. *Ecological Economics*, 60(3), 498–508. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.07.023>
- Ng, K. C., Jones, B., & Beswick, R. (1992). Hydrogeology of Grand Cayman, British West Indies: a karstic dolostone aquifer. *Journal of Hydrology*, 134(1–4), 273–295. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(92\)90039-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(92)90039-X)
- Null, K. A., Knee, K., D. Crook, E., R. de Sieyes, N., Rebolledo-Vieyra, M., Hernández-Terrones, L., & Paytan, A. (2014). Composition and fluxes of submarine groundwater along the Caribbean coast of the Yucatan Peninsula. *Continental Shelf Research*, 77, 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2014.01.011>
- Nurse, L., Cashman, A., & Mwansa, J. (2012). Confronting the Challenges of Sewerage Management in the Caribbean: A Case Study from the Island of Barbados. *Science and Policy for Sustainable Development*, 54(2), 30–43. <https://doi.org/10.1080/00139157.2012.657910>
- Ochoa, L. J. L. (2020). *Informe del estado general que guarda la “Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (Ptar’s) San Miguelito”, del Organismo Operador Cozumel. Comisión de Agua Potable y Alcantarillado, Cozumel, México.*
- OECD, (Organisation for Economic Co-Operation and Development). (2008). *Handbook on Constructing Composite Indicators, Methodology and user guide*. Organisation for Economic Co-Operation and Development, París, Francia.
- OECD, (Organisation for Economic Co-Operation and Development). (2015). *Principios de Gobernanza del Agua de la OCDE*, París, Francia.
- Oelkers, E. H., Hering, J. G., & Zhu, C. (2011). Water : Is There a Global Crisis ? *Elements*, 7, 157–162. <https://doi.org/10.2113/gselements.7.3.157>
- ONU, (Organización de las Naciones Unidas). (2014). *Integrated water resources management*. Consultado el 3 de diciembre de 2020 en: <https://www.un.org/waterforlifedecade/iwrm.shtml>
- ONU, (Organización de las Naciones Unidas). (2021). *Objetivo 6 : Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos*. ONU. Consultado el 30 de abril de 2021 en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- Orellana, R., Nava, F., & Espadas, C. (2007). El clima de Cozumel y la Riviera Maya. En *Biodiversidad acuática de la Isla de Cozumel*. Universidad de Quintana Roo - Plaza y Valdés, Ciudad de México.
- Orlove, B., & Caton, S. C. (2010). Water Sustainability: Anthropological Approaches and Prospects. *Annual Review of Anthropology*, 39(1), 401–415. <https://doi.org/10.1146/annurev.anthro.012809.105045>
- Ostrom, E. (2007). A diagnostic approach for going beyond panaceas. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(39), 15181–15187. <https://doi.org/10.1073/pnas.0702288104>
- Ostrom, E. (2009). A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems. *SCIENCE*, 325, 85–89. <https://doi.org/10.1126/science.1226338>
- Pacheco, Á. J., & Cabrera, A. (1997). Groundwater contamination by nitrates in the Yucatan Peninsula. *Hydrogeology Journal*, 5(2), 47–53.

- Pacheco, Á. J., & Cabrera, S. A. (1996). Efecto del uso de fertilizantes en la calidad del agua subterránea en el estado de Yucatán. *Ingeniería Hidráulica En México*, 11(1), 53–60.
- Pacheco, Á. J., & Cabrera, S. A. (2003). Fuentes principales de nitrógeno de nitratos en aguas subterráneas. *Ingeniería*, 7(2), 47–54.
- Pacheco, Á. J., Cabrera, S. A., & Pérez, C. R. (2004). Diagnóstico de la calidad del agua subterránea en los sistemas municipales de abastecimiento en el Estado de Yucatán, México. *Ingeniería*, 8(2).
- Pahl-Wostl, C., Sendzimir, J., Jeffrey, P., Aerts, J., Berkamp, G., & Cross, K. (2007). Managing Change toward Adaptive Water Management through Social Learning. *Ecology and Society*, 12(2), 30. <https://doi.org/10.5751/es-02147-120230>
- PAHO, (Pan American Health Organization). (2020). *2030 Agenda for Drinking Water, Sanitation and Hygiene in Latin America and the Caribbean: A Look from the Human Rights Perspective*. Pan American Health Organization. <https://doi.org/10.37774/9789275121115>
- Palafox, M. A., & Gutiérrez, T. A. (2013). Cambio climático y desarrollo turístico. Efectos de los huracanes en Cozumel, Quintana Roo y San Blas, Nayarit. *Investigación y Ciencia*, 21(58), 36–46. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=67428815005>
- Palafox, M. A., & Segrado, P. R. G. (2008). El Observatorio de Turismo, base para el Centro de Articulación Productiva de Turismo de Quintana Roo. *Teoría y Praxis*, 4(5), 161–170. <https://doi.org/10.22403/uqroomx/typ05/12>
- Pandey, V. P., Shrestha, S., Chapagain, S. K., & Kazama, F. (2011). A framework for measuring groundwater sustainability. *Environmental Science and Policy*, 14(4), 396–407. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2011.03.008>
- Patel, S. (2005). *Pilgrimage and Caves on Cozumel*. Pruffer and Brady, eds 91–112
- Pellicer-Martínez, F., & Martínez-Paz, J. M. (2016). The Water Footprint as an indicator of environmental sustainability in water use at the river basin level. *Science of the Total Environment*, 571, 561–574. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.022>
- Perevochtchikova, M., & Arellano-Monterrosas, J. L. (2008). Gestión de cuencas hidrográficas: experiencias y desafíos en México y Rusia. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 4(3), 313–325.
- Pérez, L., Bugja, R., Lorenschat, J., Brenner, M., Curtis, J., Hoelzmann, P., Islebe, G., Scharf, B., & Schwalb, A. (2011). Aquatic ecosystems of the Yucatán Peninsula (Mexico), Belize, and Guatemala. *Hydrobiologia*, 661, 407–433. <https://doi.org/10.1007/s10750-010-0552-9>
- Periódico Oficial del Estado de Quintana Roo. (2013). *Ley de cuotas y tarifas para los servicios públicos de agua potable y alcantarillado, tratamiento y disposición de aguas residuales del estado de Quintana Roo*. Periódico Oficial del Estado de Quintana Roo, Chetumal, Quintana Roo.
- Perry, E., Paytan, A., Pedersen, B., & Velazquez-Oliman, G. (2009). Groundwater geochemistry of the Yucatan Peninsula, Mexico: Constraints on stratigraphy and hydrogeology. *Journal of Hydrology*, 367(1–2), 27–40. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.12.026>
- Peters, E. J. (2015). Wastewater reuse in the Eastern Caribbean : a case study. *WasteWater Management*, 168(WM5), 232-242.

Phuong, D. N. D., Linh, V. T., Nhat, T. T., Dung, H. M., & Loi, N. K. (2019). Spatiotemporal variability of annual and seasonal rainfall time series in Ho Chi Minh city, Vietnam. *Journal of Water and Climate Change*, 10(3), 658–670. <https://doi.org/10.2166/wcc.2018.115>

PRI, (Policy Research Initiative). (2007). *Canadian Water Sustainability Index (CWSI)*. Government of Canada.

PROFEPA, (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente). (2010). *Delitos Ambientales*. Consultado el 19 de Febrero de 2021 en: https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/v/535/1/mx/delitos_ambientales.html

Pulido-Velazquez, D., Collados-Lara, A. J., & Alcalá, F. J. (2018). Assessing impacts of future potential climate change scenarios on aquifer recharge in continental Spain. *Journal of Hydrology*, 567, 803–819. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.077>

Pulido, & Sánchez. (2009). Measuring tourism sustainability: proposal for a composite index. *Tourism Economics*, 15(2), 277–296.

Pulwarty, R. S., Nurse, L., & Trotz, U. O. (2010). Caribbean Islands in a Changing Climate. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 52(6), 16–27. <https://doi.org/10.1080/00139157.2010.522460>

Quintero, A. (2020). Semarnat autoriza proyecto ecocida “Lakam-Ha.” *Cambio 22*. Consultado el 10 de Marzo de 2021 en: <https://qsnoticias.mx/semarnat-autoriza-proyecto-ecocida-lakam-ha/>

Quiroga, B. A., & Romero, M. del R. (2019). *Catálogo de estudios de las áreas naturales protegidas de Isla Cozumel (Volumen II)*. CONANP, Cozumel, México.

Raei, E., Shafiee, M. E., Nikoo, M. R., & Berglund, E. (2019). Placing an ensemble of pressure sensors for leak detection in water distribution networks under measurement uncertainty. *Journal of Hydroinformatics*, 21(2), 223–239. <https://doi.org/10.2166/hydro.2018.032>

Ramírez, R. R., Seeliger, L., & Di Pietro, F. (2016). Price, virtues, principles: How to discern what inspires best practices in water management? A case study about small farmers in the Yucatan Peninsula of Mexico. *Sustainability (Switzerland)*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/su8040385>

Raskin, P. D., Hansen, E., & Margolis, R. M. (1996). Water and sustainability: Global patterns and long-range problems. *Natural Resources Forum*, 20(1), 1–15. <https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.1996.tb00629.x>

Rechazan en Cozumel el proyecto Lakam-Ha. (2020). *Cancun Mio*. Consultado el 10 de Marzo de 2021 en: <https://www.cancunmio.com/54164754-rechazan-en-cozumel-el-proyecto-lakam-ha/>

Reguero, B. G., Méndez, F. J., & Losada, I. J. (2013). Variability of multivariate wave climate in Latin America and the Caribbean. *Global and Planetary Change*, 100, 70–84. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.09.005>

Ribeiro, D., & Zorn, M. (2021). Sustainability and Slovenian Karst Landscapes: Evaluation of a Low Karst Plain. *Sustainability*, 13(4), 1655. <https://doi.org/10.3390/su13041655>

Richards, H. G. (1937). Land and Freshwater Mollusks from the Island of Cozumel , Mexico , and Their Bearing on the Geological History of the Region. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 77(3), 249–262.

- Rivera, E., Villalobos, G. J., Azuz, I., & Rosado, F. (2004). *El manejo costero en México* (E. Rivera Arriaga, G. J. Villalobos, I. Azuz Adeath, & F. Rosado May (Eds.)). SEMARNAT, Universidad Autónoma de Campeche, CETYS-Universidad & Universidad de Quintana Roo.
- Rodríguez-Huerta, Rosas-Casals, & Hernández-Terrones, L. (2019a). A water balance model to estimate climate change impact on groundwater recharge in Yucatan Peninsula, Mexico. *Hydrological Sciences Journal*, 65(3), 470–486. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1702989>
- Rodríguez-Huerta, Rosas-Casals, & Hernández-Terrones, L. (2019b). Water societal metabolism in the Yucatan Peninsula. The impact of climate change on the recharge of groundwater by 2030. *Journal of Cleaner Production*, 235, 272–287. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.310>
- Rodríguez, J. (2006). La configuración de los paisajes hidráulicos. Visión desde el enfoque sistémico. *Nimbus*, 17–18, 145–157.
- Rogers, P., & Hall, A. W. (2003). *Effective Water Governance, learning from dialogues*.
- Rose, S., & Long, A. (1988). Monitoring Dissolved Oxygen in Ground Water Some Basic Considerations. rose1988.pdf. *Grounwater Monitoring & Remediation*, 8(1).
- Rosell, P. W., & Más, G. M. (2003). El enfoque sistémico en el contenido de la enseñanza. *Educación Médica Superior*, 17(2).
- Rosmann, T., Domínguez, E., & Chavarro, J. (2016). Comparing trends in hydrometeorological average and extreme data sets around the world at different time scales. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 5, 200–212. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.12.061>
- Rowe. (2011). Rain water harvesting in Bermuda. *Journal of the American Water Resources Association*, 47(6), 1219–1227.
- Saadat, S., Khalili, D., Kamgar-Haghighi, A. A., & Zand-Parsa, S. (2013). Investigation of spatio-temporal patterns of seasonal streamflow droughts in a semi-arid region. *Natural Hazards*, 69(3), 1697–1720. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0783-y>
- Saito, T., Hamamoto, S., Ueki, T., Ohkubo, S., & Moldrup, P. (2016). Temperature change affected groundwater quality in a confined marine aquifer during long-term heating and cooling. *Water Research*, 94, 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.01.043>
- Salas, P. M. J. A. (2015). La ciudad y sus actores: La sustentabilidad del agua en Ciudad Juárez. *Estudios Fronterizos, Nueva Época*, 16(32), 328.
- Sampieri. (2014). *Metodología de la Investigación*. McGraw-Hill / Interamericana Editores, S.A. de C.V, Ciudad de México.
- Sánchez, J. A., Álvarez, T., Pacheco, Á. J., Carrillo, L., & González, R. A. (2016). Calidad del agua subterránea: acuífero sur de Quintana Roo, México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 7(4), 75–96.
- Sánchez y Pinto, I. A., Cervantes-Martínez, A., González, H. R. A., Vázquez, C. M. E., & Guitiérrez-Aguirre, M. A. (2015). Evidencia de flujo preferencial al mar, del cenote Caletita, en Cozumel, México. *Ingeniería*, 19(1), 1–12.
- Santacruz de León, G. (2007). *Hacia una gestión integral de los recursos hídricos en la cuenca del Río Valles, Huasteca, México*. Tesis de Doctorado en Ciencias Ambientales, Facultad de

Ciencias Químicas, Ingeniería y Medicina, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Santos, C. (2019). *Paradigmas De La Gestión Integrada Del Agua (I): Una Crítica Evolutiva a La Gestión Integrada De Los Recursos Hídricos (Girh)*. 6(2), 1–21.

Saravanan, V. S. (2008). A systems approach to unravel complex water management institutions. *Ecological Complexity*, 5(3), 202–215.
<https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2008.04.003>

Savenije, H. H. G., & Van Der Zaag, P. (2008). Integrated water resources management: Concepts and issues. *Physics and Chemistry of the Earth*, 33(5), 290–297.
<https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.02.003>

Schmidt, S., & Hatch, G. (2012). El agua en México. *Foreign Affairs Latinoamérica*, 12(4), 89–96.

Schmitter-Soto, J. J. (2007). Peces dulceacuícolas. En *Biodiversidad acuática de la Isla de Cozumel* (pp. 257–264). Universidad de Quintana Roo, Cozumel, México.

Schmitter-Soto, J. J., Comín, F. A., Escobedo-Briones, E., Herrera-Silveira, J. A., Alcocer, J., Suárez-Morales, E., Elías-Gutiérrez, M., Díaz-Arce, V., Marín, L. E., & Steinich, B. (2002). Hydrogeochemical and biological characteristics of cenotes in the Yucatan Peninsula (SE Mexico). *Hydrobiologia*, 467, 215–228. <https://doi.org/10.1023/A:1014923217206>

Schnoor, J. L. (2010). *Introduction The 2010 Clarke Prize Lecture Water Sustainability in a Changing World*. National Water Research Institute, Fountain Valley, Estados Unidos.

Scholz, A. (2006). *Hydrochemische Aufnahme des Grundwassers aus Brunnen und Wasserstellen der Insel Cozumel – Mexiko*. Diplomarbeit, Institut für Angewandte Geowissenschaften Fachgebiet Hydrogeologie, Technische Universität Berlin.

Schrevel, A. (1997). ILRI Workshop: Groundwater management sharing responsibility for an open access resource. En A. Schrevel (Ed.), *Proceeding of the Wageningen water workshop*. ILRI, Países Bajos.

Schuhmann, P. W., Skeete, R., Waite, R., Lorde, T., Bangwayo-skeete, P., Oxenford, H. A., Gill, D., Moore, W., & Spencer, F. (2019). Visitors ' willingness to pay marine conservation fees in Barbados. *Tourism Management*, 71, 315–326.
<https://doi.org/10.1016/j.tourman.2018.10.011>

Schutte, F. (2006). *Handbook for the Operation of Water Treatment Works*. (F. Schutte (Ed.)). Water Research Commission, Pretoria, Sudáfrica.

Secretaría de Economía. (2001). *Norma Mexicana NMX-AA-079-SCFI-2001, Análisis de aguas - Determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA-079-1986)*. Diario Oficial de la Federación, Ciudad de México.

Secretaría de Economía. (2014). *Norma mexicana NMX-AA-074-SCFI-2014, Análisis de agua – medición del ion sulfato en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba - (cancela a la NMX-AA-074-1981)*. Diario Oficial de la Federación, Ciudad de México.

Secretaría de Salud. (1996). *NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*. Diario Oficial de la Federación, Ciudad de México.

- SECTUR, (Secretaría de Turismo). (2013). *Estudio de Competitividad Turística del Destino Cozumel Universidad*. SECTUR, Gobierno del Estado de Quintana Roo & Universidad de Quintana Roo, Ciudad de México.
- SECTUR, (Secretaría de Turismo). (2018). *Programa Marco para fomentar acciones para restablecer el balance del ciclo del agua en Cozumel*. SECTUR, Ciudad de México.
- SEDETUS, (Secretaría de Desarrollo Territorial Urbano Sustentable). (2019). *Programa Estatal de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano Sustentable de Quintana Roo*. Secretaría de Desarrollo Territorial Urbano Sustentable, Chetumal, México.
- Segrado, P. R. G., Arroyo, A. L., Amador, S. K., & Farmer, F. (2017). Motivational factors for tourists who choose Cozumel, Mexico, as a holiday destination in low seasons. *El Periplo Sustentable*, 32.
- Segrado, P. R. G., González, B. C., Arroyo, A. L., & Quiroga, G. B. A. (2017). Capacidad de carga turística y aprovechamiento sustentable de Áreas Naturales Protegidas. *CIENCIA Ergo Sum*, 24(2), 164–172.
- SEMARNAT, (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (1993). *Nom-032-ecol-1993, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las aguas residuales de origen urbano o municipal para su disposición mediante riego agrícola*. Diario Oficial de La Federación. <http://www.paot.org.mx/centro/ine-semarnat/gacetas/GE28.pdf>
- SEMARNAT, (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (1997a). *NOM-001-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales*. Diario Oficial de La Federación, Ciudad de México. <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/60197.pdf>
- SEMARNAT, (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (1997b). *NOM-003-SEMARNAT-1997 - Que establece los límites máximos permisibles de contaminates para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público*. Diario Oficial de La Federación, Ciudad de México. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAA-15-13.pdf>
- SEMARNAT, (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2007). *Estudio previo justificativo para el establecimiento del área natural protegida Área de protección de flora y fauna "Isla Cozumel", Quintana Roo, México*. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Ciudad de México.
- SEMARNAT, (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2016). *Programa de Manejo para el área de Protección de Flora y Fauna la porción norte y la franja costera oriental, terrestres y marinas de la Isla de Cozumel*. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Ciudad de México.
- SEMARNAT, (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), & CONAGUA, (Comisión Nacional del Agua). (2014). *Programa Nacional Hídrico*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Ciudad de México.
- SEMARNAT, (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), & CONAGUA, (Comisión Nacional del Agua). (2018). *Ley Federal de Derechos, Disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Ciudad de México.
- Senecal, C., & Madramootoo, C. A. (2013). Tools for the implementation of integrated water

- resources management (IWRM) in the Caribbean. *Water Policy*, 15(5), 859–870. <https://doi.org/https://doi.org/10.2166/wp.2013.016>
- SENER, (Secretaría de Energía). (2015). *Evaluación Rápida del Uso de la Energía. Cozumel, Quintana Roo, México*. Gobierno de la República de México, Ciudad de México.
- Sharma, M. K., & Kumar, M. (2020). Sulphate contamination in groundwater and its remediation : an overview. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(74). <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10661-019-8051-6>
- Shewhart, W. A., & Wilks, S. S. (2016). *Time series analysis : forecasting and control* (Quinta edición). Wiley, Nueva Jersey, Estados Unidos.
- Shrestha, S., Semkuyu, D. J., & Pandey, V. P. (2016). Assessment of groundwater vulnerability and risk to pollution in Kathmandu Valley, Nepal. *Science of the Total Environment*, 556, 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.021>
- SIC, (Sistema de Información Cultural). (2021). *Universidades en Cozumel, Quintana Roo*. Gobierno de México, consultado el 17 de febrero de 2021 en: http://sic.gob.mx/lista.php?table=universidad&estado_id=23&municipio_id=1
- Simeonov, V., Simeonova, P., Tsakovski, S., & Lovchinov, V. (2010). Lake Water Monitoring Data Assessment by Multivariate Statistics. *J. Water Resource and Protection*, 2, 353–361. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2010.24041>
- Simonovic, S. P. (2020). Systems approach to management of water resources-toward performance basedwater resources engineering. *Water (Switzerland)*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/W12041208>
- SINA, (Sistema Nacional de Información del Agua). (2019). *Indicadores de la calidad de agua subterránea 2012-2017 en Cozumel*. Consultado el 24 de Abril de 2019 en: sina.conagua.gob.mx/sina/calidadAguaSub.php
- Singh, R. K., Murty, H. R., Gupta, S. K., & Dikshit, A. K. (2012). An overview of sustainability assessment methodologies. *Ecological Indicators*, 15(1), 281–299. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.01.007>
- Sivakumar, B. (2011). Water crisis: From conflict to cooperation — an overview. *Hydrological Sciences Journal*, 56(4), 531–552.
- Snellen, W. B., & Schrevel, A. (2004). *IWRM: for sustainable use of water 50 years of international experience with the concept of integrated water management*. Ministry of Agriculture, Nature and Food Quality, Países Bajos.
- Sophocleous, M. (2000). From safe yield to sustainable development of water resources - The Kansas experience. *Journal of Hydrology*, 235, 27–43. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00263-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00263-8)
- Spaw. (1978). Late Pleistocene Carbonate Bank Deposition: Cozumel Island, Quintana Roo, Mexico. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 28, 601–619.
- SSEQRoo, (Secretaria de Salud del Estado de Quintana Roo). (2019). *Boletín Epidemiológico Estatal, Casos Nuevos de Enfermedades semana 52 de 2019*. Gobierno del Estado de Quintana Roo, Servicios Estatales de Salud, Chetumal, México.
- Steenbeck, T. L., Schirmer, M., Koch, C., Giese, S., & Frausto, M. O. (2016). Sustainable waste

- management: the example of the informal settlement “Las Fincas” on Cozumel Island, Mexico. *Waste Management and The Environment VIII, 1(Wm)*, 187–194. <https://doi.org/10.2495/wm160171>
- Steube, C., Richter, S., & Griebler, C. (2009). First attempts towards an integrative concept for the ecological assessment of groundwater ecosystems. *Hydrogeology Journal*, *17*, 23–35. <https://doi.org/10.1007/s10040-008-0346-6>
- Stevanović, Z., Jemcov, I., & Milanović, S. (2007). Management of karst aquifers in Serbia for water supply. *Environmental Geology*, *51*, 743–748. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0393-z>
- Stoessell, R. K., Moore, Y. H., & Coke, J. G. (1993). The Occurrence and Effect of Sulfate Reduction and Sulfide Oxidation on Coastal Limestone Dissolution in Yucatan Cenotes. *Ground Water*, *31*(4), 566–575. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1993.tb00589.x>
- Swenson, H. A., & Baldwin, H. L. (1965). *A primer on water quality*. United States Geological Survey, Washington, Estados Unidos.
- Szeroczyńska, K., & Zawisza, E. (2015). Cenotes – Lakes of the Yucatan Peninsula (México). *Studia Quaternaria*, *32*, 53–57. <https://doi.org/10.1515/squa-2015-0005>
- Tank, J. L., Reisinger, A. J., & Rosi, E. J. (2017). Nutrient Limitation and Uptake. En *Methods in Stream Ecology* (147–171). Elsevier Inc., Amsterdam, Países Bajos.
- Taylor, M. A., Stephenson, T. S., Chen, A. A., & Stephenson, K. A. (2012). Climate Change and the Caribbean: Review and Response. *Caribbean Studies*, *40*(2), 169–200. <https://doi.org/10.1353/crb.2012.0020>
- Téllez, V. O., Cabrera, C. E. F., Linares, M. E., & Bye, R. (1989). *Las plantas de Cozumel*. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Tercera Legislatura Constitucional del Estado de Quintana Roo. (2017). *Ley de agua potable y alcantarillado del estado de Quintana Roo*. Periódico Oficial del Estado de Quintana Roo, Chetumal, México.
- Thorntwaite. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, *38*(1), 55–94.
- Todorovic, A., & Verruijt, E. (1968). A note on the ghyben-herzberg formula. *International Association of Scientific Hydrology. Bulletin*, *13*(4), 43–46. <https://doi.org/10.1080/02626666809493624>
- Toews, M. W., Whitfield, P. H., & Allen, D. M. (2007). Seasonal statistics: The “seas” package for R. *Computers and Geosciences*, *33*, 944–951.
- Torres, M. C., Basulto, Y. Y., Cortés, J., García, K., Koh, A., Puerto, F., & Pacheco, Á. J. (2014). Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo de contaminación del agua subterránea en Yucatán. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, *1*(3), 189–203.
- Tortajada, C., & Contreras-Moreno, N. (2005). Institutions for Water Management in Mexico. En C. Gopalakrishnan, C. Tortajada, & A. K. Biswas (Eds.), *Water Institutions: Policies, Performance and Prospects* (pp. 99–130). Springer Berlin, Heidelberg, Alemania.
- Trejo, I., & Dirzo, R. (2002). Floristic Diversity of Mexican seasonally dry tropical forest. *Biodiversity and Conservation*, *11*, 2063–2048.

- Tzoraki, O., Dokou, Z., Christodoulou, G., Gaganis, P., & Karatzas, G. (2018). Assessing the efficiency of a coastal Managed Aquifer Recharge (MAR) system in Cyprus. *Science of the Total Environment*, 626, 875–886. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.160>
- UN Water. (2017). *Summary Report Global workshop for integrated monitoring of Sustainable Development Goal 6 on water and sanitation*. Naciones Unidas, Holanda.
- UNICEF Pacific. (2018). *Pacific WASH Resilience Guidelines: A practical tool for all those involved in addressing the resilience of water, sanitation and hygiene services in the Pacific*. UNICEF Pacific, Suva, Fiji.
- USGS, (United States Geological Survey). (2021). *Saline Water and Salinity*. Consultado el 25 de Enero de 2021 en: https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/saline-water-and-salinity?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects
- Valencia. (2020). Experto de la UNAM destaca sobreexplotación de acuíferos subterráneos. *Forbes*. Consultado el 28 de Abril de 2021 en: https://www.forbes.com.mx/experto-de-la-unam-destaca-sobreexplotacion-de-acuiferos-subterranos/?platform=hootsuite&fbclid=IwAR2nc57_Zwft6n1eLHPkQrVLbIqW2fi9DzJVSVhi9IP1mSvcmL3R11YSTo0
- Van Beynen, P., Akiwumi, F. A., & Van Beynen, K. (2018). A sustainability index for small island developing states. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 25(2), 99–116. <https://doi.org/10.1080/13504509.2017.1317673>
- Van Beynen, P., Brinkmann, R., & Van Beynen, K. (2012). A sustainability index for karst environments. *Journal of Cave and Karst Studies*, 74(2), 221–234. <https://doi.org/10.4311/2011SS0217>
- Van Beynen, P., & Townsend, K. (2005). A disturbance index for karst environments. *Environmental Management*, 36(1), 101–116. <https://doi.org/10.1007/s00267-004-0265-9>
- Van der Berg, H., & Takken, W. (2007). Viewpoint: A framework for decision-making in integrated vector management to prevent disease. *Tropical Medicine and International Health*, 12(10), 1230–1238. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3156.2007.01905.x>
- Van Der Zaag, P., & Savenije, H. H. G. (2014a). Concepts and definitions. En P. van der Zaag & H. H. G. Savenije (Eds.), *Principles of Integrated Water Resources Management* (pp. 2–26). UNESCO-IHE, Delft, Países Bajos.
- Van Der Zaag, P., & Savenije, H. H. G. (2014b). *Principles of Integrated Water Resources Management* (P. van der Zaag & H. H. G. Savenije (Eds.)). UNESCO-IHE, Delft, Países Bajos. <https://doi.org/10.1201/b13146-9>
- Vázquez-Domínguez, E., Suárez-Atilano, M., Booth, W., González, B. C., & Cuarón, A. D. (2012). Genetic evidence of a recent successful colonization of introduced species on islands: *Boa constrictor imperator* on Cozumel Island. *Biological Invasions*, 14, 2101–2116. <https://doi.org/10.1007/s10530-012-0217-x>
- Villasuso, P. M. J., Sánchez, y P. I. A., Canul, M. C., Casares, S. R., Baldazo, E. G., Souza, C. J., Poot, E. P., & Pech, A. C. (2011). Hydrogeology and conceptual model of the karstic coastal aquifer in northern Yucatan state, Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13, 243–260.
- Villegas, G. (2016, April 26). Cozumel tiene agua dulce para una década más. *Riviera Maya (Novedades Quintana Roo)*. Consultado el 17 de Enero de 2020 en:

<https://sipse.com/novedades/agua-dulce-cozumel-abasto-recurso-limitado-202210.html>

Vosper, E. L., Mitchell, D. M., & Emanuel, K. (2020). Extreme hurricane rainfall affecting the Caribbean mitigated by the paris agreement goals. *Environmental Research Letters*, *15*(10). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9794>

Vrba, J., Hirata, R., Girman, J., Haie, N., Lipponen, A., Neupane, B., Shah, T., & Wallin, B. (2007). *Groundwater resources sustainability indicators*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris, Francia.

WCED, (World Commission on Environment and Development). (1987). *Our common future*. Oxford University Press, Oxford, Estados Unidos.

Weaver, A. H., Finkbeiner, E., Reddy, S. M. W., Leslie, H. M., Cavanaugh, K. C., Siegel, K., Aburto-Oropeza, O., Nenadovic, M., Ulibarria-Valenzuela, J. J., Basurto, X., Moreno-Báez, M., Sánchez-Rodríguez, A., Sievanen, L., Hinojosa-Arango, G., Nagavarapu, S., Cota-Nieto, J. J., & Erisman, B. E. (2015). Operationalizing the social-ecological systems framework to assess sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *112*(19), 5979–5984. <https://doi.org/10.1073/pnas.1414640112>

White, G. F. (1998). Reflections on the 50-year international search for integrated water management. *Water Policy*, *1*, 21–27. [https://doi.org/10.1016/S1366-7017\(98\)00003-8](https://doi.org/10.1016/S1366-7017(98)00003-8)

WHO, (World Health Organization). (1988). *Hardness in Drinking Water - Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality*. World Health Organization, Ginebra, Suiza.

WHO, (World Health Organization), & UNICEF, (United Nations Children´s Fund). (2017). *WASH in the 2030 Agenda*. World Health Organization, Ginebra, Suiza.

WRC, (Water Resources Center). (2011). *Minnesota water sustainability framework*. World Health Organization and the United Nations Children´s Fund, Ginebra, Suiza.

Wurl, J., Giese, S., Frausto, M. O., & Chale, G. (2003). Ground Water Quality Research on Cozumel Island, State of Quintana Roo, Mexico. *Second International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers— Monitoring, Modeling, and Management.*, Mérida, México, 171–176.

Wythe, K. (2013). Reclaiming a valuable, clean resource, Texas cities increasingly embracing potable reuse. *Texas Water Resources Institute TXH2O*, 26–28. <http://twri.tamu.edu/publications/txh2o/summer-2013/reclaiming-a-valuable-clean-resource/>

Yadav, R., Tripathi, S. K., Pranuthi, G., & Dubey, S. K. (2014). Trend analysis by Mann-Kendall test for precipitation and temperature for thirteen districts of Uttarakhand. *Journal of Agrometeorology*, *16*(2), 164–171.

Yáñez-Mendoza, G., Zarza-González, E., & Mejía-Ortíz, L. M. (2007). Sistemas anquihalinos. En *Biodiversidad acuática de la Isla de Cozumel* (pp. 49–70). Universidad de Quintana Roo, Cozumel, México.

Zack, A., & Lara, F. (2003). Optimizing fresh groundwater withdrawals in Cozumel, Quintana Roo, Mexico – A feasibility study using scavenger wells. En C. Voss & L. Konikow (Eds.), *Second International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers— Monitoring, Modeling, and Management* (pp. 1–10). SWAT.

Zepeda, Q. D. S., Loeza, R. C. M., Munguía, V. N. E., Peralta, J. E., & Velazquez, C. L. E.

(2018). Sustainability strategies for coastal aquifers: A case study of the Hermosillo Coast aquifer. *Journal of Cleaner Production*, 195, 1170–1182.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.191>

¿Qué percepción tiene usted sobre el uso del agua en la Isla por parte de la Población?

¿Por qué?

¿Qué percepción tiene usted sobre el uso del agua en la Isla por parte de las Empresas que ofrecen servicios a turistas? ¿Por qué?

¿Qué percepción tiene usted sobre el uso del agua en la Isla por parte de la Turistas?

¿Por qué?

Nombre:

Fecha:

Tiempo viviendo en la Isla:

Clave:

Anexo 2. Índice original: Karst Sustainability Index (Van Beynen et al., 2012).

	Target %
Social Domain	
S1. Local ownership, private or public, of caves and springs	>80
S2. Locals employed in karst-related jobs	>80
S3. Equitable access for population to karst water resources	100
S4. Percentage of population displaced by development of karst landscape	<5
S5. Indigenous peoples' access to karst resources	100
S6. Percentage of schools offering karst education in curriculum	100
S7. Percentage of karst-related tourist facilities offering informal education	100
S8. Local governments offering karst-related information on websites or through publications	100
Environmental Domain	
En1. Increase in amount of karst area forested or in native vegetation	↑20
En2. Increase in amount of karst area designated protected	↑20
En3. Biodiversity of species in karst environment	Stable
En4. Riparian zones around sinking-streams and sinkhole sources	>75
En5. Decrease in number of impaired springs as measured by biological or water quality indicators	↓20
En6. Percentage of water-supply springs and wells that are monitored	100
En7. Current landfills preventing groundwater contamination	100
En8. Collection of sewage from all homes in urban areas	100
En9. Tertiary treatment of urban wastewater	100
En10. Monitoring of the condition of heavily used caves	100
En11. Enforcement of local regulations	100
Economic Domain (Resource Use)	
Ec1. Abandoned commercial quarries or mines that have been reclaimed	100
Ec2. Water extraction from aquifer and springs	Stable
Ec3. Increase in agricultural water efficiency (\$ value/consumption)	↑20
Ec4. Area of urbanization and roads	Stable
Ec5. Forestry on the karst landscape that is sustainable	100
Ec6. Increase in number of ecotourism ventures related to karst landscape	↑20

Anexo 3. Tarifas de agua potable del mes de febrero de 2020- Oficio No. CAPA-CC-051-2020 (CAPA, 2020).

Rango de consumo		Cuota base (pesos)	Cuota adicional *m ³ (pesos)
límite inferior	límite superior		
0	10	135.35	0.00
11	20	157.27	16.64
21	40	394.69	25.63
41	60	942.50	32.81
61	999,999	2,117.52	80.25

Rango de consumo		Cuota base (pesos)	Cuota adicional *m ³ (pesos)
límite inferior	límite superior		
0	10	123.81	0.00
11	20	193.78	27.96
21	50	487.06	40.12
51	100	1,735.87	49.21
101	200	3,071.21	64.95
201	999,999	8,002.12	64.95

Rango de consumo		Cuota base (pesos)	Cuota adicional *m ³ (pesos)
límite inferior	límite superior		
0	10	61.96	0.00
11	50	171.29	15.16
51	100	778.20	31.28
101	200	2,846.23	50.61
201	500	7,915.29	66.09

501	1,000	27,718.92	152.14
1,001	999,999	102,323.79	159.88

Rango de consumo		Cuota base (pesos)	Cuota adicional *m ³ (pesos)
límite inferior	límite superior		
0	10	320.87	0.00
11	50	352.94	32.04
51	1,500	1,646.42	42.02
1,501	5,000	63,183.36	61.71
5,001	20,000	309,108.53	75.82
20,001	999,999	1,518,683.07	83.62

Rango de consumo		Cuota base (pesos)	Cuota adicional *m ³ (pesos)
límite inferior	límite superior		
0	10	320.87	0.00
11	20	352.94	31.61
21	50	664.92	31.61
51	100	1,614.81	31.61
101	150	3,197.96	31.61
151	250	4,781.12	31.61
251	350	7,947.42	31.61
351	500	11,113.72	31.61
501	750	15,863.17	31.61
751	1,000	23,778.92	31.61
1,001	1,500	31,694.68	31.61
1,501	999,999	47,526.19	31.61

Anexo 4. Oficios respuesta a las solicitudes 00625918 - Oficio No. DDUE/SE/2018/401 y 00625818 - No. Oficio DDUE/SE/2018/402.



No. Oficio: DDUE/SE/2018/401
Asunto: Respuesta a solicitud de información


C. DERWALL ERNESTO SOLÍS FRÍAS
JEFE DE LA UNIDAD DE TRANSPARENCIA,
ACCESO A LA INFORMACIÓN PÚBLICA
Y PROTECCIÓN DE DATOS PERSONALES
DEL MUNICIPIO DE COZUMEL, QUINTANA ROO
PRESENTE

Reciba por este medio un cordial saludo, así mismo me dirijo a usted para darle respuesta a la solicitud de información mediante la Plataforma Nacional de Transparencia, con el número de folio 00625918, misma que le fue asignado con el número de expediente UTAIPDP/2018/132 mediante la cual solicita:

"Solicito el estatus individual actual (Pristino, relleno, grado de perturbación y/o explotado) de todos los cenotes ubicados en la Isla Cozumel. La información la requiero desagregada por estatus individual de cada cenote, señalando la denominación común y ubicación de cada uno".

Se anexa la información correspondiente y quedo en espera de una respuesta para la confirmación de atención a la solicitud.

Cozumel Quintana Roo a 06 de junio de 2018
"Identidad, Honestidad y Fuerza"


M. C. Shivani Velázquez Martínez
Subdirectora de Ecología



C.p. L. C. Pastora Ku Chunab - Contraloría Municipal
C.p. Archivo.



COZUMEL

 IslaCozumelMx
www.islacozumel.gob.mx

CALLE 13 SUR S/N ENTRE AV. SANTEL
E. HILGAR Y C. DONALDO GLEBERG
CD. ANDRÉS QUINTANA ROO, C.P. 77060
COZUMEL, QUINTANA ROO, MEXICO
Tel. 01 (987) 8728600

Expediente: UTAIPPD/2018/132

Cozumel, Quintana Roo, 19 de junio de 2018 y de conformidad con las facultades conferidas a la Unidad de Transparencia y Protección de Datos Personales del Municipio de Cozumel, por la misma Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública del Estado de Quintana Roo, de conformidad con lo dispuesto por el artículos 1, 4, 6, 7, 8, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 21, 22, 66 fracciones II, III, IV, V, y XIX, 142, 147, 148, 151, 155, 157, 163, 164 y 165 de la Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública del Estado de Quintana Roo. Con domicilio en Calle 13 Sur S/N, entre Avenida Rafael E. Melgar y Calle Gonzalo Guerrero, Colonia Andrés Quintana Roo, C.P. 77664 de esta ciudad, en cumplimiento del ejercicio del derecho de acceso a la información pública -----

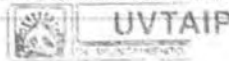
----- Se procede a dar contestación a la solicitud requerida por esta Unidad, por lo que en término de los artículos, 66 fracciones II, III, IV, V y XIX, 142, 151, 155, 157, 163, 164 y 165 de la Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública del Estado de Quintana Roo, vigente en el Estado, la Unidad de Transparencia y Acceso a la Información Pública del Municipio de Cozumel, pone a su disposición la información anteriormente solicitada que consta de una foja simple, el cual remito en PDF.-----

De conformidad con lo dispuesto en el artículo 168 de la Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública del Estado de Quintana Roo, se le hace de su conocimiento que en caso de estar inconforme con la respuesta a su solicitud, puede acudir en un término no mayor a 15 días hábiles al Instituto de Acceso a la Información y Protección de Datos Personales (IDAIP), con domicilio en Av. Othón P. Blanco No. 66, Colonia Barrio Bravo, Chetumal, Quintana Roo, C.P. 77098, Teléfono 01800-00-48247 o 019838323561 a fin de presentar el Recurso de Revisión correspondiente como medio de impugnación, en los términos legales que conforme a derecho corresponda.-----

-----Notifíquese al interesado y ordénese los trámites de publicación.-----

Así lo acordó el Jefe de Unidad de Transparencia, Acceso a la Información Pública y Protección de Datos Personales del Municipio de Cozumel, Quintana Roo, C. Derwall Ernesto Solís Frias.-----

C. C. B. MICHNO

GOBIERNO DEL ESTADO DE
QUINTANA ROO
COZUMEL IslaCozumelMx
www.islacozumel.gob.mxCALLE 13 SUR S/N ENTRE AV. RAFAEL
E. MELGAR Y C. GONZALO GUERRERO
COL. ANDRÉS QUINTANA ROO, C.P. 77664
COZUMEL, QUINTANA ROO, MÉXICO
Tel. 01 (987) 8729800

Anexo 1. –Información básica sobre formaciones Kársticas identificadas en Isla Cozumel.

Actualmente en Isla Cozumel se encuentra en desarrollo diversos estudios para aumentar el conocimiento de los cenotes ubicados dentro de la misma. La información aquí proporcionada se basa en los estudio disponibles:

LISTA DE FORMAS KARSTICAS CENOTES EN LA ISLA DE COZUMEL									
ID	Nombre del Cenote	UTM (X) E.O	UTM (Y) N.S	Tamaño (L)	Longitud (D)	Pristino	Rellenado	GRADO DE PERTURBACIÓN	EXPLOTADO
1	Rancho San Miguel Cenote	510571	2268046	8 m	3 m	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
2	Rancho San Miguel 1	510572	2267277	9 m	2 m	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
3	Cenote del Dr. Villanueva	511875	2267432	12 m	4 m	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
4	Cenote Bambu	513094	2266049	61 m	51.8 m	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
5	Universidad de Quintana Roo	505648	2265892	15 m	1.5 m	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
6	Cenote Chu-Ha (San Francisco)	504635	2265738	38.1 m	18.3 m	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
7	Aerolito	502282	2263076	16.3 km	7 m	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
8	X-Ian-Ha	504780	2262971	80 m	35 m	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
9	Tres Potrillos	501304	2261433	94 m	38.1 m	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
10	KM 1 (Quebrada System)	500435	2260665	6 m	5 m	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
11	Roka Bomba (Quebrada System)	500579	2260665	2 m	5 m	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
12	Cilpa (Quebrada System)	501139	2260619	2 m	4 m	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
13	Cenote Coodrilo	497971	2259302	2403 m	17.4 m	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
14	San Andrés El Central	499130	2253595	15 m	4 m	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
15	Rancho Juvenio El Central	500145	2250828	6 m	3 m	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
17	Cenote 1, Rancho el Chino El Central	500580	2248988	12 m	5 m	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
18	Cenote 2, Rancho el Chino El Central	506815	2246833	3 m	1 m	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
19	Cenote 3, Rancho el Chino El Central	508138	2250620	5 m	1.5 m	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
20	Sin Barba	504695	2265320	1335.9 m	1.5 m	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
21	Gardner	505043	2266269	ND	0.7 m	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
22	Invernadero	505180	2266700	ND	0.3 m	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
23	Invernadero Pozo	505208	2266717	ND	1 m	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
24	De la 65	504887	2265429	1441 m	1.8 m	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
25	Sol Caribe	503968	2264486	1142.3 m	0.8 m	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
26	Maravilla	505486	2265815	2000.5 m	0.2 m	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
27	2 Vaquillas	509982	2266437	4810.8 m	0.8 m	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
28	Mauro V	511227	2267556	5587.9 m	0.5 m	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
29	Cerca del Aeropuerto	508836	2266378	3681.4 m	1 m	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
30	Caletita	503769	2266113	125.8 m	1.2 m	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
31	Caletita Pozo	503750	2266065	136.3 m	0.8 m	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
32	Sol Caribe Pozo	503968	2264486	ND	ND	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
33	Eclipsa	510597	2267159	ND	ND	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
34	Sacbe	500336	2259387	ND	ND	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
35	Depresion	511748	2266909	ND	ND	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
36	Chempita	504266	2253841	ND	ND	NO	NO	DESCONOCIDO	SI
37	Chempita 2	502709	2253303	ND	ND	NO	NO	DESCONOCIDO	SI

REFERENCIAS
Milholin, 1996
Kensley, 1988; Mejía-Ortiz et al., 2006a & b
Kensley, 1988; Mejía-Ortiz et al., 2006a & b
Yáñez, 1999; Mejía-Ortiz et al., 2006b
Bowman, 1987; Holsinger, 1992; Sternberg and Shotte, 2004; Mejía-Ortiz et al., 2006b
Bowman, 1987; Holsinger, 1992; Sternberg and Shotte, 2004; Mejía-Ortiz et al., 2006b
Mejía-Ortiz et al., 2006b



No. Oficio: DDUE/SE/2018/402
Asunto: Respuesta a solicitud de información

C. DERWALL ERNESTO SOLÍS FRÍAS
JEFE DE LA UNIDAD DE TRANSPARENCIA,
ACCESO A LA INFORMACIÓN PÚBLICA
Y PROTECCIÓN DE DATOS PERSONALES
DEL MUNICIPIO DE COZUMEL, QUINTANA ROO
PRESENTE

Reciba por este medio un cordial saludo, así mismo me dirijo a usted para darle respuesta a la solicitud de información mediante la Plataforma Nacional de Transparencia, con el número de folio **00625818**, misma que le fue asignado con el número de expediente **UTAIPDP/2018/131** mediante la cual solicita:

"Solicito los mapas que señalen la ubicación de todos los Cenotes dentro de la Isla de Cozumel"

Se anexa la información correspondiente y en espera de una respuesta para la confirmación de atención a la solicitud.

Cozumel Quintana Roo a 06 de junio de 2018
"Identidad, Honestidad y Fuerza"

Shivani Velázquez Martínez
M. C. Shivani Velázquez Martínez
Subdirectora de Ecología

RECIBIÓ
06 JUN 2018
2:33 PM

C.p.p. L. C. Pastora Ku Chunab - Contraloría Municipal
C.p.p. Archivo.



[f](#) [@](#) [t](#) [v](#) IslaCozumelMx
www.islacozumel.gob.mx

CALLE 33 SUR S/N ESTRETO DE WAJÉES,
E. HILGAR Y S. ESTRETO DE GUERRERO,
COL. ANDRÉS QUINTANA ROO, C.P. 77664,
COZUMEL, QUINTANA ROO, MÉXICO
Tel. 01 (987) 8729800

Expediente: UTAIPPD/2018/131

Cozumel, Quintana Roo, 19 de junio de 2018 y de conformidad con las facultades conferidas a la Unidad de Transparencia y Protección de Datos Personales del Municipio de Cozumel, por la misma Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública del Estado de Quintana Roo, de conformidad con lo dispuesto por el artículos 1, 4, 6, 7, 8, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 21, 22, 66 fracciones II, III, IV, V, y XIX, 142, 147, 148, 151, 155, 157, 163, 164 y 165 de la Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública del Estado de Quintana Roo. Con domicilio en Calle 13 Sur S/N, entre Avenida Rafael E. Melgar y Calle Gonzalo Guerrero, Colonia Andrés Quintana Roo, C.P. 77664 de esta ciudad, en cumplimiento del ejercicio del derecho de acceso a la información pública.—

— Se procede a dar contestación a la solicitud requerida por esta Unidad, por lo que en término de los artículos, 66 fracciones II, III, IV, V y XIX, 142, 151, 155, 157, 163, 164 y 165 de la Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública del Estado de Quintana Roo, vigente en el Estado, la Unidad de Transparencia y Acceso a la Información Pública del Municipio de Cozumel, pone a su disposición la información anteriormente solicitada que consta de una foja simple, el cual remito en PDF.—

De conformidad con lo dispuesto en el artículo 168 de la Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública del Estado de Quintana Roo, se le hace de su conocimiento que en caso de estar inconforme con la respuesta a su solicitud, puede acudir en un término no mayor a 15 días hábiles al Instituto de Acceso a la Información y Protección de Datos Personales (IDAIP), con domicilio en Av. Othón P. Blanco No. 66, Colonia Barrio Bravo, Chetumal, Quintana Roo, C.P. 77098, Teléfono 01800-00-48247 o 019838323561 a fin de presentar el Recurso de Revisión correspondiente como medio de impugnación, en los términos legales que conforme a derecho corresponda.—

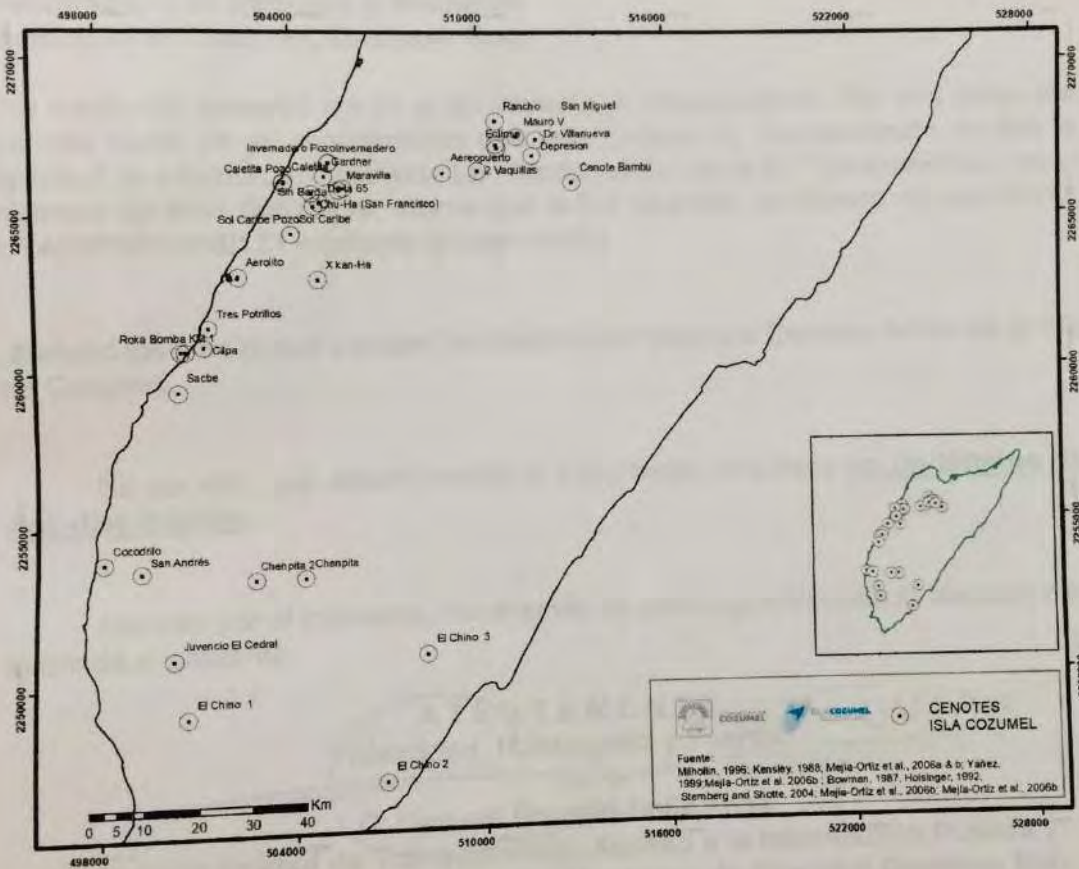
-----Notifíquese al interesado y ordénese los trámites de publicación.-----

Así lo acordó el Jefe de Unidad de Transparencia, Acceso a la Información Pública y Protección de Datos Personales del Municipio de Cozumel, Quintana Roo. C. Derwall Ernesto Solís Frías.-----

C. C. P. REGISTRO

UVTAIP
EL AYUNTAMIENTOMUNICIPIO DE
COZUMEL IslaCozumelMx
www.islacozumel.gob.mxCALLE 13 SUR S/N ENTRE AV. RAFAEL
E. MELGAR Y C. GONZALO GUERRERO,
COL. ANDRÉS QUINTANA ROO, C.P. 77664
COZUMEL, QUINTANA ROO, MÉXICO
Tel. 01 (987) 8729600

Anexo 1. –Formaciones Kársticas identificadas en Isla Cozumel.



Anexo 5. Folleto sobre el foro del agua organizado en el 2018 (anverso y reverso).

AGENDA DEL AGUA 2030 Isla Cozumel



Introducción

Isla Cozumel tiene una gran riqueza biológica con buen estado de conservación, razón por la cual cuenta con cinco áreas naturales protegidas y seis reconocimientos internacionales, entre ellos, ser una Reserva de la Biósfera del Programa MaB, UNESCO, la única en México que incluye una ciudad.



Sin embargo, este acuífero es un delgado lente de agua dulce que descansa sobre agua salina; por ello la extracción debe ser limitada y ordenada, para preservar la calidad y cantidad del agua subterránea. Para evitar la extracción en forma desordenada del acuífero de Cozumel se declaró como zona de veda en 1981.

Con casi 5 millones de turistas al año, Cozumel es una zona de gran auge turístico, lo que ha ocasionado el explosivo crecimiento poblacional, y por ende, el aumento en la demanda del agua. Sin cuerpos de agua superficiales, la única fuente de agua dulce para todos los usos es el agua subterránea.

AGENDA DEL AGUA ISLA COZUMEL 2030

Esta agenda tiene por objeto generar una estrategia integral para la **correcta gestión, aprovechamiento y protección del recurso hídrico**, que involucre a todos los usuarios, comprometidos con la sustentabilidad del agua para las generaciones futuras.

Misión

A través del monitoreo de las condiciones del uso sustentable del recurso hídrico se valora el estado que guarda el agua, para tomar decisiones acertadas e informadas a fin de mejorar las condiciones de la gestión de los diferentes usuarios del agua.

Visión

Al 2030 lograr una gestión y uso sustentable del recurso hídrico, involucrando a los habitantes, al sector económico y a los visitantes de isla Cozumel.

Objetivos

- ☑ Desarrollar indicadores de las condiciones del uso sustentable del recurso hídrico.
- ☑ Valorar el estado del uso sustentable del recurso hídrico.
- ☑ Tomar decisiones acertadas e informadas para mejorar las condiciones de la gestión de



RETOS DE ISLA COZUMEL

- Generar herramientas básicas de gestión, como apoyo a la toma de decisiones.
- Mejorar la infraestructura para el servicio de agua potable, recolección y saneamiento.
- Contar con un marco legal acorde con las características de suelo y actividades económicas de Cozumel.
- Incentivar el uso de ecotecnias, ahorro y aprovechamiento energético.
- Generar una visión integral a largo plazo que asegure el recurso hídrico.
- Crear un mecanismo que permita la sustentabilidad financiera de la gestión del agua.
- Generar vías efectivas de comunicación entre los tres órdenes de gobierno para hacer eficiente el uso del agua en Cozumel.
- Fortalecer las capacidades locales a todos los sectores de la comunidad.

LÍNEAS ESTRATÉGICAS DE ACCIÓN

- Conservación de los ecosistemas:
 - Mantenimiento de los servicios ambientales
- Desarrollo:
 - Gestión
 - Manejo
 - Aplicación de la normatividad
 - Cooperación intersecretarial
- Apoyo logístico:
 - Diagnósticos (calidad, uso, red geológica, etc.)
 - Proyecciones
 - Impactos
 - Estudios de vulnerabilidad
 - Educación y capacitación para la sustentabilidad.

Primeros productos

El estudio Hidrogeológico de Isla Cozumel:

- Censo y mapeo de cenotes y pozos.
- Evaluación de la calidad del agua.
- Prospección geofísica.
- Dirección de flujo local subterráneo
- Modelo conceptual hidrogeológico.
- Modelos de escorrentía superficial, cuencas, nivel de escala a diversas alturas de los cuerpos del agua.
- Tipos de depresiones.
- Modelo hidrodinámico.

Grupo de trabajo del Agua

Es un grupo de especialistas y actores clave para la gestión del agua, responsables del desarrollo de la Agenda del Agua para Isla Cozumel. Actualmente lo conforman:

- Ayuntamiento Municipal de Cozumel
- Comisión de Agua Potable y Alcantarillado - CAPA
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas - CONANP
- Universidad de Quintana Roo campus Cozumel - UQROO
- Planetario Cha'an Ka'an de Cozumel
- Círculo Espeleológico del Mayab A.C. - CEM
- Manejadores de Recursos Naturales A.C. - MRN



CONTACTO:

Anexo 6. Primer artículo.

Impulsando la innovación digital de la red de Aguas CDMX

CONVICTO: Agua Climática y Recursos Hídricos

HACIA UN MANEJO INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO EN ISLA COZUMEL, QUINTANA ROO.

HERNÁNDEZ-FLORES, GERARDO;
GUTIÉRREZ-ACURRE, MARTHA ANGÉLICA, &
CERVANTES-MARTÍNEZ, ADRIÁN
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS Y HUMANIDADES, UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO,
COZUMEL, QUINTANA ROO, MÉXICO.



ARTÍCULO

Resumen:

Cozumel es la tercera isla más grande de México y se encuentra en el estado de Quintana Roo. En ella, la fuente más viable de agua dulce es el acuífero que se recarga principalmente por infiltración de agua de lluvia, por lo que la disponibilidad del recurso es altamente sensible a los efectos antrópicos y climáticos. Después de una revisión bibliográfica y entrevistas a informantes clave (tomadores de decisiones, actores sociales, administradores del recurso agua etc.) el documento identifica los principales elementos ambientales (entorno y estado del recurso), económicos (actividades socioeconómicas y servi-

cios de distribución) y sociales (usos y tradiciones, marco jurídico y demografía) característicos de la Isla que deben ser descritos para desarrollar estrategias para el manejo sustentable del recurso hídrico.

Introducción

La Organización de las Naciones Unidas considera al sexto objetivo del desarrollo sostenible como: "Agua limpia y saneamiento". La meta 6.5 plantea implementar el manejo integrado de recursos hídricos en todos los niveles para el 2030. Globalmente se reconocen los efectos de la actual crisis climática a través de un aumento de la temperatura promedio,

541

Impulsando la innovación digital de la red de Aguas CDMX

CONVICTO: Agua Climática y Recursos Hídricos

elevación del nivel medio del mar y la alteración de los patrones de precipitación. Estas alteraciones, junto con la sobreexplotación y contaminación de los acuíferos por factores como el incremento poblacional y las actividades productivas, han elevado el grado de presión sobre los recursos hídricos, poniendo en riesgo la disponibilidad en volumen y calidad del agua en el mediano y largo plazo.

Cozumel es especialmente sensible a los efectos ya mencionados del cambio climático, pero particularmente a la modificación en los patrones de precipitación pluvial, pues la lluvia es la única fuente de recarga del acuífero en la isla. Además del influenciar la recarga de acuíferos, el cambio en el clima y su variabilidad tienen influencia sobre patrones de uso del agua (Taylor *et al.*, 2012, p.322) y por ende en la disponibilidad para consumo humano. El impacto sobre la disponibilidad hídrica en la Isla sería significativo, pues el recurso almacenado en el acuífero es la única fuente viable de agua dulce para surtir a la población y las actividades productivas (SECTUR, 2018, p.34); pues al no existir un sistema de tubería que conecte con la parte

continental, el ingreso de volúmenes significativos es limitado. Por ende, es prioritario identificar los elementos que se relacionan con el acuífero para caracterizar sus tendencias y estado actual, pues son la base para fundamentar estrategias locales para el manejo sustentable del recurso hídrico.

La isla y su acuífero

La Isla se encuentra en el sureste de México, en el estado de Quintana Roo, y cuenta con una superficie de 473 km². Su suelo está formado principalmente por roca carbonatada (denominado como karst), por lo que se favorece la infiltración del agua al subsuelo, provocando que la mayor parte de los cuerpos de agua sean subterráneos. El acuífero se reconoce a nivel nacional como "Isla de Cozumel 2305" y dentro de la Región Hidrológico-administrativa XII. En el modelo actual del acuífero, se plantea una lente de agua dulce que flota sobre agua marina y que disminuye de espesor con relación a la cercanía con la línea de costa; aunque este modelo debe ser ajustado para reflejar la complejidad del sistema. En 2015 se estimó un valor medio anual

542

de agua dulce en la isla entre 19 y 31.4 millones de metros cúbicos (Comisión Nacional del Agua, 2015, p.2; Coral Zaragoza, 2015, p.91).

La población actual es de aproximadamente 90,000 habitantes y la principal actividad económica es el turismo (SECTUR, 2013, p.39). El volumen de turistas fluctúa de acuerdo con la temporada y, en 2015, se registró el arribo de 575,055 turistas y 3,391,241 excursionistas (Segrado Pavón *et al.*, 2017, p.165). El agua para beber en la isla proviene de empresas que desalan, purifican y comercializan el recurso; mientras que el agua necesaria para surtir a las necesidades de la población y las actividades productivas proviene principalmente de pozos de extracción ubicados en el área de captación. Aunque el área de captación abarca una mayor superficie, se delimitó en el Plan de Ordenamiento Ecológico Local dentro de la Unidad de Gestión Ambiental (UGA) C1. En ella se encuentran 261 pozos administrados por la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado (CAPA), quien monitorea mensualmente 11 variables indicadoras de calidad de agua, siendo

de las más importantes los coliformes fecales, cloruros, sólidos totales disueltos y cloro residual.

Manejo del recurso en la Isla.

Actualmente, el manejo del acuífero en la UGA C1 se realiza principalmente por CAPA, que selecciona los pozos óptimos para la extracción con base en el monitoreo de la calidad del agua. Afuera de la zona de captación, CAPA realiza campañas de concientización sobre el uso del agua, el manejo de la red de distribución, del drenaje y de las aguas residuales. (Periódico Oficial del Estado de Quintana Roo, 2017, p.1-3).

Por otra parte, en la Isla se han comenzado iniciativas como "La agenda del agua", donde en 2018 participantes de siete sectores, incluyendo a la Universidad de Quintana Roo, el Ayuntamiento local y organizaciones sociales, se reunieron para discutir sobre el estado del recurso hídrico; sin embargo, aún es necesario incentivar el desarrollo de estrategias multisectoriales e integrales para el manejo sustentable del recurso.

Hacia el manejo sustentable del agua.

Actualmente no se han reportado evidencias de problemas importantes con la disponibilidad o calidad en agua distribuida por CAPA, por lo que aún es posible el desarrollo de medidas preventivas que son más eficientes que las correctivas.

Para el desarrollo de estas estrategias, es necesaria una colaboración multidisciplinaria y multisectorial, abordándola de una manera integral y con la suficiente plasticidad para adaptarse a los retos emergentes (Vrba *et al.*, 2007, p.1-2). La estrategia debiera considerar, como mínimo, el recurso, los usuarios, la escala y un periodo de tiempo (Gumbo & Zaag, 2014, p.9). A la vez, se debe

Figura 1. Elementos por caracterizar, identificar tendencias y situación actual en Cozumel.



incentivar la formación de expertos locales por su conocimiento regional, beneficios económicos y la continuidad en los proyectos (Biswas, 1998, p.302).

El modelo presentado (véase Figura 1) es el resultado de un análisis de documentos de 1978 a 2018 y el análisis de 7 entrevistas a toma-

dores de decisiones (académicos, asociaciones civiles e iniciativa privada) relacionados con el acuífero en Cozumel. Para elaborarlo se consideraron como base los 3 ejes propuestos por el desarrollo sostenible. En el modelo se muestran los elementos necesarios que deben ser descritos para el manejo sostenible del agua en la Isla y que requieren atención inmediata:

- 1) Evaluación de la influencia de las modificaciones de los patrones de precipitación, el aumento promedio de temperatura y la elevación del nivel medio del mar sobre la recarga en el acuífero.
- 2) Descripción de las especies y dinámicas en la porción dulceacuicola subterránea para caracterizar poblaciones e identificar posibles especies bioindicadoras de calidad de agua.
- 3) Caracterización de las principales amenazas al volumen y la calidad de agua en el acuífero, como son: contaminantes, efecto de los eventos atmosféricos, como los huracanes, sobreexplotación e intrusiones salinas.

- 4) Generación de información sobre los patrones de consumo de los diferentes sectores (incluyendo el turístico), el volumen de agua consumido proveniente de los pozos artesanales y particulares, así como de los factores que inciden sobre este consumo a través del tiempo.
- 5) Evaluación de estrategias que incentiven la seguridad alimentaria y energética y que consideren que la mayor parte de los alimentos, insumos y electricidad no son producidos en la isla.
- 6) Descripción de los factores que influyen sobre las entradas y salidas, las vías por las que circula y destinos finales del agua del acuífero.
- 7) Divulgación de información sobre el acuífero y creación de espacios para la integración de los diferentes sectores para la toma de decisiones referentes con su manejo.
- 8) Descripción de los usos y tradiciones relacionados con el agua, el marco jurídico y demográfico, pues la generación de estrategias sociales basadas en las características propias

de quienes viven y visitan la Isla incrementa la posibilidad de apropiamiento y su efectividad.

Conclusiones

Cozumel es altamente sensible a los efectos de una crisis climática y ambiental, pues por su insularidad, la única fuente viable para la recarga del acuífero es la precipitación. Por ello, existe una urgencia para el desarrollo de estrategias que incentiven el conocimiento y buen manejo del recurso agua, para entender y asegurar la disponibilidad hídrica. Cualquier medida propuesta en Cozumel debe estar fundamentada por información sobre las tendencias y la situación actual del recurso. Si bien se identificaron los elementos por caracterizar, se reconocen entre las prioridades: influencia de la crisis climática sobre la recarga; biota asociada con el acuífero; amenazas, consumo y hábitos de consumo por los diferentes sectores; seguridad alimentaria y eléctrica; flujos del recurso; divulgación de información; integración de los usuarios en la toma de decisiones considerando la descripción de las características sociales, cultu-

rales, económicas y ambientales de los habitantes y visitantes.

Los autores quisieran agradecer al CONACYT por el apoyo brindado para este proyecto (No. beca 483462), a los revisores anónimos quienes enriquecieron la calidad del manuscrito y al Programa de Doctorado en Desarrollo Sostenible de la Universidad de Quintana Roo. ■

Bibliografía consultada

- Biswas, A. K. (1998). Water Management in Latin America and the Caribbean, *International Journal of Water Resources Development*, 14(3), 293–303.
- Comisión Nacional del Agua (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Isla de Cozumel (2305). *Diario Oficial de la Federación*, México.
- Coral Zaragoza, E. (2015). Diagnóstico del estado de implementación del grado de presión hídrico sobre el acuífero de la isla de Cozumel. División de Desarrollo Sustentable, Maestría en Gestión Sustentable del Turismo. Universidad de Quintana Roo, México.
- Gumbo, B. and Zaag, P. Van Der (2014). Principles of Integrated Water Resources Management (IWRM) consultado en línea <https://pietervanderzaag.files.wordpress.com/2015/02/principles-of-integrated-water-resources-management-october-2014.pdf>
- Periódico Oficial del Estado de Quintana Roo (2017). Ley de agua potable y alcantarillado del estado de Quintana Roo. Chetumal, Q.Roo.
- SECTUR (Secretaría de Turismo) (2013). Agendas de Competitividad de los destinos turísticos de México. Quintana Roo, México.
- SECTUR (Secretaría de Turismo) (2018). Programa Marco para fomentar acciones para restablecer el balance del ciclo del agua en Cozumel México.
- Segrado Pavón, R. G. et al. (2017). Capacidad de carga turística y aprovechamiento sustentable de Áreas Naturales Protegidas, *CIENCIA ergo sum*, 24(2), pp. 164–172.
- Taylor, R. et al. (2013). Ground water and climate change. *Nature Climate Change*, 3, 322–329.
- Vrba, J. et al. (2007). Groundwater resources sustainability indicators, IAHS-AISH Publication. Eds. J. Vrba and A. Lipponen. Paris, Francia. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.



Impluvium

Publicación digital de la Red del Agua UNAM

Número 10, Enero - Marzo 2020

www.agua.unam.mx

Anexo 7. Segundo artículo.

Ciencia, Ambiente y Clima, Vol.4, No. 1, enero-junio, 2021 • ISSN (impreso): 2636-2317 • ISSN (en línea): 2636-2333

DOI: <https://doi.org/10.22206/cac.2021v4i1.pp7-17>

EL MANEJO INTEGRADO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN EL ACUÍFERO INSULAR DE COZUMEL, QUINTANA ROO, MÉXICO

*Integrated Water Resource Management in the island
aquifer of Cozumel, Quintana Roo, Mexico*

Gerardo Hernández-Flores

Universidad de Quintana Roo, Unidad Académica
Cozumel, Qroo, México.
ORCID: 0000-0002-3730-4708
Correo-e: l722423@uqroo.mx

Adrián Cervantes Martínez

Universidad de Quintana Roo, Unidad Académica
Cozumel, ORCID: 0000-0002-8947-8558
Correo-e: adcervantes@uqroo.edu.mx

Martha Angélica Gutiérrez-Aguirre

Universidad de Quintana Roo, División de Desarrollo
Sustentable (DDS), Unidad Académica Cozumel.
Depto. de Ciencias y Humanidades.
ORCID: 0000-0002-9329-820X
Correo-e: margutierrez@uqroo.edu.mx

Recibido: 10/11/2020 • Aprobado: 25/6/2021

Cómo citar: Hernández-Flores, G., Gutiérrez-Aguirre, M. A., & Cervantes Martínez, A. (2021). El Manejo Integrado de los Recursos Hídricos en el acuífero insular de Cozumel, Quintana Roo, México. *Ciencia, Ambiente y Clima*, 4(1), 7-17. DOI: <https://doi.org/10.22206/cac.2021v4i1.pp7-17>

Resumen

El Manejo Integrado de los Recursos Hídricos (MIRH) es de vital importancia para ambientes insulares donde el volumen del acuífero es limitado y el incremento en la demanda, junto con el deterioro en su calidad, amenazan su disponibilidad para el futuro. En el siguiente ensayo se analiza el MIRH en la isla Cozumel (México) a partir de la definición de la Asociación Mundial para el Agua (AMA), con lo cual se caracteriza la situación actual de las políticas, instituciones e instrumentos (PIeIs) en el contexto local y federal. El análisis bajo la definición de la AMA permite homologar criterios para abordar el MIRH y así aportar al enriquecimiento del concepto a través del estudio del caso particular en la isla Cozumel; además de contribuir a identificar los retos para la implementación del MIRH en la zona de estudio. Mediante este ensayo fue posible identificar las bases de las PIeIs y su sincronización local con la federal, así como el manejo actual del acuífero, y

Abstract

The Integrated Water Resource Management (IWRM) is vital for island environments where the volume of the aquifer is finite. The following essay analyzes IWRM in Cozumel Island (Mexico) based on the definition of the Global Water Partnership (GWP), which allows to characterize the current situation of policies, institutions and instruments for management in the local and federal context. The analysis under the definition of the GWP allows to standardize criteria to address the IWRM and thereby contribute to the enrichment of the concept through the study of specific cases such as Cozumel Island; it also contributes to identify current challenges for the implementation of the IWRM in the study area. Throughout this essay, the bases and concordance between local and federal level of policies, institutions and instruments, along with the current aquifer management used in the island, were identified. Furthermore, a lack of instruments



Esta obra está bajo licencia Internacional Creative Commons Atribución- NoComercial- CompartirIgual 4.0 Internacional

se detectó una falta de instrumentos para la planeación participativa con los cuales se involucre a los usuarios del recurso, a nivel local, dentro de las decisiones referentes a su manejo.

Palabras clave: desarrollo sostenible; gestión ambiental; México; isla; agua subterránea.

that allow local participation on management decisions was recognized.

Keywords: Sustainable Development; Environmental management; Mexico; Island; Groundwater.

Introducción

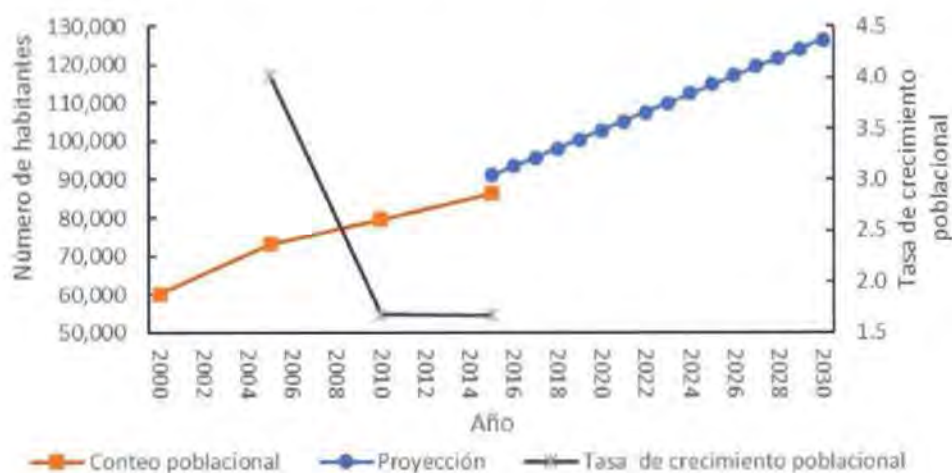
El agua es uno de los recursos más importantes para el desarrollo de la vida y de las actividades socioeconómicas en el mundo, sobre todo en zonas costeras e insulares, donde se concentra más del 50% de la población mundial (Durán-Sánchez, Álvarez-García & del Río-Rama, 2018). Desafortunadamente, la disponibilidad del recurso se ve amenazada por los efectos del cambio climático, las actividades socioeconómicas y el incremento poblacional; por tanto, es necesario el desarrollo de estrategias basadas en un Manejo Integrado de los Recursos Hídricos (MIRH). De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas, el sexto objetivo del desarrollo sostenible plantea la implementación del MIRH en todos los niveles para el año 2030. Actualmente, la definición más citada y aceptada en trabajos publicados sobre el MIRH es la propuesta por la Asociación Mundial Para el Agua (Benites, 2017; Galvez & Rojas, 2019), estableciendo que:

El MIRH es un proceso que promueve el manejo y desarrollo coordinado del agua, de la tierra y de los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico resultante de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales (AMA, 2000, p. 24).

El MIRH es de vital importancia para ambientes donde la disponibilidad natural de agua dulce es limitada, como es el caso de los acuíferos insulares.

Las islas son particularmente vulnerables al incremento de la presión sobre el recurso debido a la demanda por el crecimiento socioeconómico y a los efectos del cambio climático (Cashman, 2017). Cozumel es una isla en el sureste de México, de aproximadamente 473 km², cuya principal actividad económica es el turismo (Calleja & González, 2016; CONAGUA, 2015a). En Cozumel la tasa de crecimiento poblacional promedio en el período comprendido entre los años 2000 y 2015 fue de 2.46, con una proyección de 126,344 habitantes para el año 2030 (Figura 1), por lo que se espera un incremento de la demanda del recurso hídrico. El acuífero en la isla se recarga únicamente por la infiltración de agua de lluvia, siendo el volumen almacenado la única fuente viable actual para satisfacer las necesidades socioeconómicas de la población residente e intermitente (Gutiérrez-Aguirre, Cervantes-Martínez & Coronado-Álvarez, 2008). Esta recarga podría ser afectada por los efectos del cambio climático, pues en la región del Caribe se espera un aumento de la temperatura de 2 a 3°C (Hall *et al.*, 2013), un decremento en la precipitación de hasta un 20% (Cashman, Nurse & John, 2010) y un aumento de 5 a 10 mm del nivel medio del mar por año (Cashman, 2014). La condición de insularidad es por la que Cozumel puede considerarse un modelo importante para la implementación del MIRH, pues su acuífero está limitado al área de la isla y se encuentra dentro de un solo municipio en el país.

Figura 1. Número de habitantes en Cozumel, proyección poblacional al 2030 y tasa de crecimiento poblacional por cada cinco años. Elaborado con datos de INEGI (2017), SECTUR (2013,2018).



En este ensayo se analizará la situación actual del Manejo Integrado de los Recursos Hídricos desde la definición de la Asociación Mundial para el Agua, para caracterizar el estado actual de las políticas, las instituciones y los instrumentos como elementos para su implementación en el acuífero insular de Cozumel, Quintana Roo (México), dentro del contexto nacional.

Desarrollo

El concepto de MIRH se consolidó a partir de la conferencia de Mar de Plata, en el año 1977, y en la Reunión Mundial para el Desarrollo Sostenible, sostenida en el año 1992, pues previamente se

manejan los conceptos de desarrollo de recursos hídricos y manejo de recursos hídricos (Grigg, 2008; Hassing *et al.*, 2009; ONU, 2014). El objetivo del concepto de MIRH definido por AMA es el de lograr un balance entre la eficiencia económica, la equidad social y la sostenibilidad de los ambientes, tomando como base los 4 principios de Dublín (AMA, 2000; Hassing *et al.*, 2009; Martínez-Santos, Aldaya & Llamas, 2014) (Figura 2). Por lo tanto, para el manejo del recurso hídrico se consideran 4 dimensiones: los usuarios, el recurso, la dimensión espacial y la dimensión temporal (Van Der Zaag & Savenije, 2014).

Figura 2. Marco general para el MIRH, modificado de GWP (2014).



Debido al reconocimiento del MIRH como un proceso dinámico, la conceptualización de este aún se encuentra en franco enriquecimiento y fortalecimiento, por tal razón actualmente no existe una definición universal, aunque abordarlo desde la definición de la AMA permite homologar aproximaciones con otros trabajos y reducir ambigüedades a través de los estudios de caso, con los cuales es posible reducir la brecha entre el concepto teórico y la implementación (Ibisch, Bogardi & Borchardt, 2016; Petit, 2016). Desde este sentido se abordará el caso de Cozumel.

Los desafíos para el MIRH no son solo a nivel conceptual, sino también en su implementación, pues se requiere de una sinergia entre las políticas, los actores, el recurso y el desarrollo económico (Kadi, 2014). Por eso, la AMA recomienda para la implementación del MIRH comenzar creando un “ambiente propicio” (AMA, 2000, p. 35) a nivel nacional a través de: 1) Políticas locales y provinciales; 2) Desarrollo institucional y 3) Instrumentos de manejo. Además, es necesario ubicar a las medidas locales dentro del contexto nacional y que estas reflejen concordancia entre ellas. La sección a conti-

nuación nos permite determinar que en cuanto a políticas, instituciones e instrumentos, dentro del contexto federal y en la isla Cozumel, existe un ambiente propicio para alcanzar el MIRH.

Por ejemplo, existe un marco legal que apoya el desarrollo de políticas que establecen lineamientos para quienes se relacionan con el recurso, considerando la equidad, la integridad y la eficiencia del uso de los recursos según las propuestas de Grigg (2008), Snellen y Schrevel (2004), Van Der Zaag y Savenije (2014), con el objeto de asegurar la eficiencia a largo plazo.

Es así que en México, a nivel federal, existe la Ley Nacional de Aguas (LAN), la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) y el Programa Nacional Hídrico (PNH), los cuales están alineados con disposiciones internacionales en temas como el agua y el desarrollo sostenible (Córdova, 2014). A nivel regional, se cuenta con el Programa Hídrico Regional de la región Hidrológico-Administrativa XII Península de Yucatán, en el cual abordan las necesidades locales relacionadas con el manejo del agua y las acciones para la proble-

mática regional (CONAGUA, 2015b). Finalmente, en el estado de Quintana Roo existe la Ley de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Quintana Roo (LAPAEQR), donde se establecen las bases para la administración y la prestación de servicios de alcantarillado y de agua potable (Tercera Legislatura Constitucional del Estado de Quintana Roo, 2017). Para hacer frente a los posibles efectos del cambio climático, en 2013 se promulgó la Ley de Acción de Cambio Climático en el Estado de Quintana Roo, junto con la implementación de talleres para la adaptación al cambio en recientes años; sin embargo, la realidad es que en Cozumel hay limitaciones por la falta de información y de análisis de variables hidrometeorológicas y de medidas concretas de adaptación ante los efectos del cambio climático (Palafox & Gutiérrez, 2013).

El desarrollo institucional incluye a las organizaciones constituidas formalmente, las redes de comunidad local, las ideas y la información que sirven de base para que puedan operar tomadores y manejadores del recurso (AMA, 2000); en México, a partir de 1989, el organismo administrativo, consultivo, normativo y técnico del agua es la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), anteriormente conocida como la Secretaría de Recursos Hidráulicos (CONAGUA, 2018; Tortajada & Contreras-Moreno, 2005). En la isla Cozumel, la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado (CAPA) es el organismo encargado de la extracción, la potabilización y la distribución del recurso hídrico, así como de la vigilancia, el mantenimiento y la reparación de las instalaciones correspondientes (Tercera Legislatura Constitucional del Estado de Quintana Roo, 2017). Adicionalmente, CAPA determina la viabilidad de los pozos de extracción a través del monitoreo de variables indicadoras de la calidad del agua, bajo metodologías establecidas dentro de las Normas Oficiales Mexicanas; como por ejemplo, la NOM-127-SSA1-1994, donde se establecen los límites permisibles de calidad y los tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

El papel de instituciones como CONAGUA es el de asegurar que se aborde, desarrolle y maneje el recurso dentro del contexto de la planeación nacional (Falkland, 1992); aunque, de acuerdo con Córdova (2014), CONAGUA ha perdido credibilidad institucional en sus labores debido a una lista de 13 razones, entre las que se incluyen la dirección por parte de políticos en vez de personal especializado, la ineficiencia administrativa y la corrupción. Adicionalmente, pese a la creación del Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), en 1992, y el decreto de 12 regiones hídricas, en 1997, para lograr el manejo del agua a escala local y regional, el actual esquema de manejo del agua institucional (CONAGUA y CAPA) es mayormente centralizado (Guerrero, 2019; López *et al.*, 2017), dificultando la adecuada repartición de financiamiento y ocasionando una ineficiencia operativa por excesivos trámites burocráticos.

De acuerdo con la Figura 2, CAPA como institución debería procurar orientar sus actuales estrategias hacia organizaciones basadas en las comunidades para facultar de herramientas apropiadas y recursos sostenibles, con el fin de resolver problemas de manera local (AMA, 2000); por tal razón, le corresponde a CONAGUA favorecer un ambiente propicio (políticas y legislación) a nivel nacional, que sea menos centralizado, para incentivar estas estrategias por CAPA.

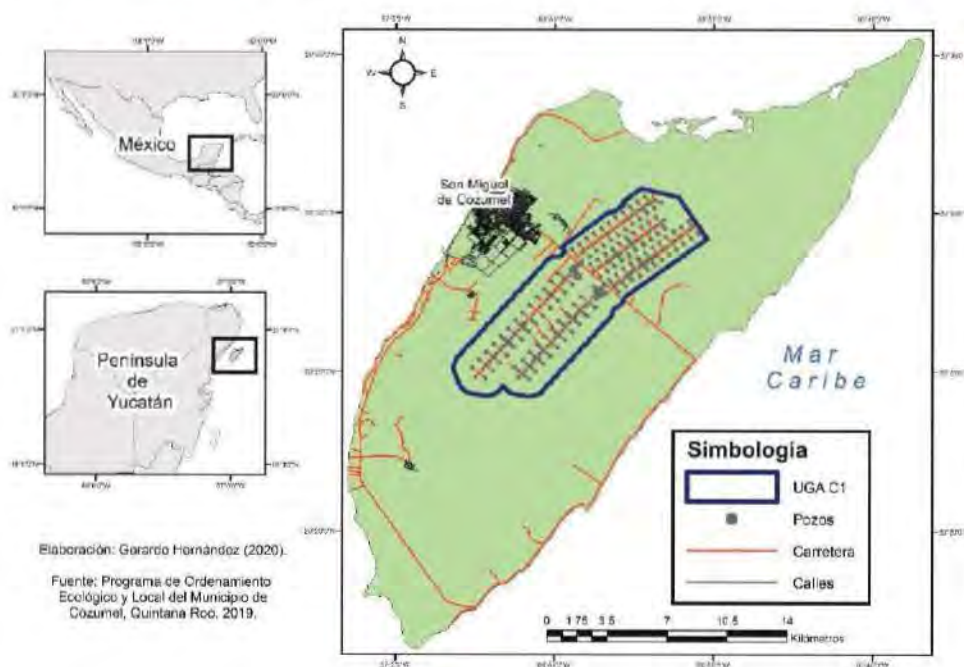
Finalmente, “los instrumentos de manejo para el MIRH son las herramientas y métodos que permiten y ayudan a los tomadores de decisiones a llevar a cabo elecciones racionales e informadas entre acciones alternativas” (AMA, 2000, p. 55), tales como: disponibilidad y demanda del recurso, sistemas de información y comunicación, instrumentos regulatorios y económicos, entre otros. En México, CONAGUA cuenta con instrumentos para el manejo del agua en donde se incluye a los Consejos de Cuenca como mecanismos de participación, los mismos que en el año 2007, para atender los problemas específicos de las zonas geográficas,

dieron lugar a 89 Comités Técnicos de Aguas Subterráneas (COTAS) (CONAGUA, 2020). Desafortunadamente, no se ha generado a partir de los COTAS a algún órgano auxiliar enfocado en el acuífero isla Cozumel.

Por otra parte, en la isla se cuenta con instrumentos para la gestión y el manejo de zonas costeras como cinco Áreas Naturales Protegidas (ANP), un Programa de Ordenamiento Ecológico Local (POEL) y un

Programa de Desarrollo Urbano (PDU), Evaluaciones de Impacto Ambiental y una Zona Federal Marítimo Terrestre (Quiroga & Romero, 2019; Rivera *et al.*, 2004). Estos instrumentos están más dirigidos hacia la conservación a través de la zonificación ambiental y a partir de ellos se ha asignado a la zona centro-norte de la isla como la Unidad de Gestión Ambiental C1, con una superficie de 68.85 km² para la conservación de la cobertura natural para así asegurar la recarga del acuífero (Figura 3).

Figura 3. Unidad de Gestión Ambiental C1 en Cozumel, limitada por el polígono azul dentro del cual se observa la ubicación de los pozos profundos que distribuyen el agua desde el acuífero hasta la zona urbana.



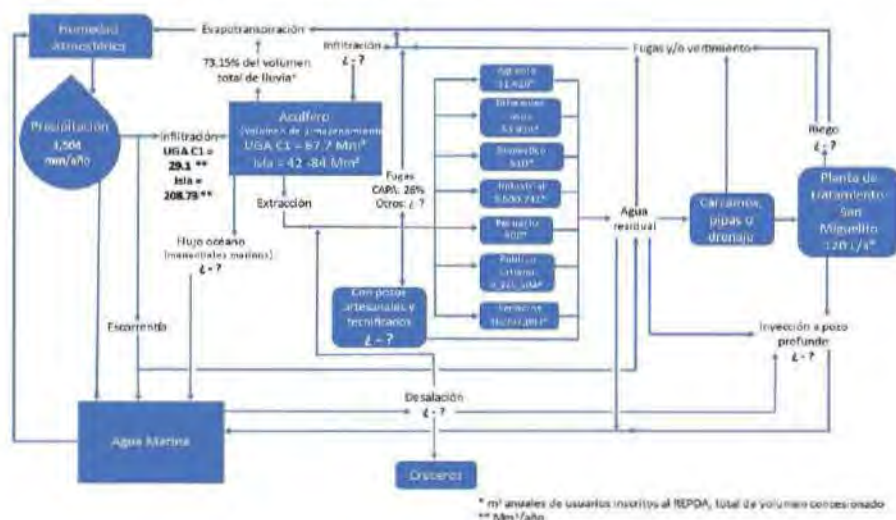
Para implementar adecuadamente el MIRH es necesario una sinergia entre las políticas, las instituciones y los instrumentos. Según lo establecido en los párrafos previos, en Cozumel hay bases de políticas e instituciones, pues existe el marco jurídico e institucional para el manejo. Con relación a los instrumentos, la existencia de decreto de un área que favorezca a la recarga del acuífero y con esto a la disponibilidad en calidad y cantidad de agua es ventajoso; sin embargo, aún son necesarios instrumentos para un esquema de planeación participativa que involucre a los usuarios a nivel local; los espacios o las estrategias en las cuales se incluya la participación de la comunidad y/o usuarios del recurso en las decisiones con respecto al acuífero son escasas o nulas en Cozumel, lo cual decrementa la gobernanza del recurso y la integralidad del manejo hídrico. Además, actualmente no hay financiamiento nacional o internacional, pues no existe un plan concreto de MIRH al cual financiar.

Consideramos que la toma de decisiones debe estar fuertemente fundamentada en un análisis, una caracterización actualizada de los elementos relacionados con el acuífero y el grado de influencia de cada uno sobre la disponibilidad, por lo que es necesario un espacio para la compilación, el análisis y la generación de información con la cual se puedan fijar objetivos y definir estrategias para el MIRH. Una vez que se tengan descritos los mencionados elementos, se deberá actuar sobre aquellos más vulnerables o prioritarios para la conservación del recurso hídrico, integrando usuarios e instituciones dentro de las decisiones de manejo, además de buscar la sostenibilidad de las estrategias mediante fuentes para cubrir los costos contemplados dentro

del proyecto, pudiendo ser recursos monetarios, bienes o servicios.

Al respecto, con información disponible de variables hidrometeorológicas, espesor promedio del área de captación, superficie del área de captación, volumen concesionado para extracción de agua subterránea y tratamiento de agua residual, se propone un modelo del flujo hídrico en Cozumel en el cual se describen de manera integral al origen, los movimientos y el destino del agua dulce en la isla (Figura 4). Este modelo es una herramienta que contribuye con el MIRH, pues permite identificar cargas ambientales en diferentes etapas, seleccionar varias alternativas con el mismo propósito e identificar problemáticas para la planeación de estrategias de manejo (Uche *et al.*, 2013). Con el modelo fue posible identificar las siguientes áreas de oportunidad que en el corto y mediano plazo podrían propiciar un mejor manejo del acuífero en Cozumel: 1) sistematización de información en los volúmenes de flujo al océano; 2) extracción del volumen de agua preciso usado por usuarios del REPDÁ; 3) caracterización de pozos y volúmenes extraídos de pozos no inscritos al REPDÁ; 4) determinación de los volúmenes y destinos de agua tratada en plantas desaladoras y 5) proporción de agua de la planta de tratamiento que es inyectada a pozo profundo, puntos de inyección y empleada en riego. El contar con esta información permitirá definir el flujo hídrico en la isla (cuánto hay, dónde está y a dónde se moviliza el agua), con lo cual se pueden establecer objetivos y plantear estrategias sinérgicas entre políticas, instituciones y usuarios para atender prioridades que contribuyan con el MIRH en Cozumel.

Figura 4. Flujo hídrico en Cozumel, Quintana Roo. Elaboración propia con información de H. Ayuntamiento del Municipio de Cozumel Q.Roo (2011), CONAGUA (2015a), Coral (2015), Lesser, Azpeitia & Lesser (1978), SENER (2015) & CONAGUA (2019).



De continuar con el manejo actual, lo más seguro es que los problemas de disponibilidad y calidad de agua comiencen a ser frecuentes y tenderán a agudizarse con el paso del tiempo. El MIRH no es un punto estratégico en el futuro al que se llegará, sino un constante proceso de actualización de estrategias ante las cambiantes condiciones ambientales, sociales y económicas que se relacionen con los acuíferos. Idóneamente se deberían de aplicar desde una perspectiva preventiva, en conjunto con el desarrollo, para promover su sostenibilidad, considerando la continuidad de las estrategias en el largo plazo (Cashman, 2017). Desafortunadamente, en la mayoría de los casos, las estrategias del MIRH tienden a ser de naturaleza correctiva, lo cual incrementa su complejidad y dificultan su implementación. Como parte de las estrategias preventivas se debe considerar que el desarrollo socioeconómico de las comunidades en islas debería tomar al

recurso hídrico como base de políticas, instituciones e instrumentos, un tipo de desarrollo hidrocentrista. Esto significa que las decisiones relacionadas con el desarrollo económico y social deberían tomarse basándose en la disponibilidad y calidad del acuífero insular en el largo plazo. En este contexto se propuso el modelo de flujo hídrico de Cozumel que, si fuese disponible a escala local y regional, podría usarse como un instrumento de enlace entre las políticas públicas y las instituciones encargadas de la gestión y el manejo de agua para su uso potable.

Conclusión

El análisis del MIRH definido por AMA aporta elementos para el fortalecimiento del concepto a través de la revisión de las particularidades del manejo en un acuífero insular. Se definieron e identificaron dentro del contexto federal y en Cozumel

políticas regionales y locales, desarrollo institucional e instrumentos para la implementación del MIRH. En la isla Cozumel se reconoce la presencia de un ambiente propicio para el manejo integrado porque existe un marco político, institucional y de instrumentos para la gestión. Desafortunadamente, todavía hay rezagos de centralización institucional, falta de financiamiento y ausencia de instrumentos para la integración de usuarios dentro de las decisiones relacionadas con el manejo y el análisis de información sobre el acuífero. El modelo de flujo hídrico propuesto es un instrumento que contribuye con la caracterización de la disponibilidad y la demanda del agua, con lo cual es posible definir objetivos y alinear políticas, instituciones e instrumentos para atender prioridades que contribuyan con el MIRH en Cozumel.

Los autores agradecen al CONACyT por el apoyo brindado para este proyecto (No. beca 483462); a los revisores anónimos, quienes enriquecieron la calidad del manuscrito, y al Programa de Doctorado en Desarrollo Sostenible de la Universidad de Quintana Roo.

Referencias

- AMA (Asociación Mundial para el Agua). (2000). *Manejo integrado de recursos hídricos. TAC background papers NO. 4* (1era ed.). Estocolmo: Global Water Partnership.
- Benites, G. V. (2017). IWRM and the legacies of large-scale agriculture in the Peruvian Amazon. *Alternautas*, 4(2), 114-127.
- Calleja, S. C. & González, D. A. (2016). Mercantilización de la cultura en aras de ofrecer una experiencia turística estandarizada. Reflexiones desde el caso de Cozumel, México. *Revista Iberoamericana de Turismo*, 6, 82-95. Doi: 10.2436/20.8070.01.15.
- Cashman, A. (2014). Water security and services in the Caribbean. *Water*, 6(5), 1187-1203. Doi:10.3390/w6051187.
- Cashman, A. (2017). Why isn't IWRM working in the Caribbean? *Water Policy*, 19, 587-600.
- Cashman, A., Nurse, L., & John, C. (2010). Climate Change in the Caribbean: The Water Management Implications. *The Journal of Environment & Development*, 19(1), 42-67.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2015a). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Isla de Cozumel (2305)*. Quintana Roo.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2015b). *Programa Hídrico Regional 2014-2018 de la región Hidrológico-Administrativa XII Península de Yucatán*. México, D.F.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2018). *Estadísticas del agua en México*. Ciudad de México: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2019). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2020). *Programa Nacional Hídrico 2020-2024 - Resumen*. México: Comisión Nacional del Agua.
- Coral, E. (2015). *Diagnóstico del estado de implementación del grado de presión hídrico sobre el acuífero de la isla de Cozumel* (Maestría en gestión sustentable del turismo). Cozumel: Universidad de Quintana Roo.
- Córdova, B. G. (2014). *La ciudad y sus actores. La sustentabilidad del agua en Ciudad Juárez* (1era ed.). Ciudad Juárez: El Colegio de Chihuahua.
- Durán-Sánchez, A., Álvarez-García, J., & del Río-Rama, M. de la C. (2018). Sustainable water resources management: A bibliometric overview. *Water (Switzerland)*, 10, 1191.
- Falkland, A. (1992). *Small tropical island - water resources of paradises lost*. (A. Falkland, Ed.). UNESCO.
- Galvez, V. & Rojas, R. (2019). Collaboration and integrated water resources management: A literature review. *World Water Policy*, 5(2), 179-191. Doi: 10.1002/wwp2.12013.

- Grigg, N. S. (2008). Integrated water resources management: balancing views and improving practice. *Water International*, 33(3), 279-292.
- Guerrero, H. (2019). *Water Policy in Mexico*. Cham: Springer International Publishing AG.
- Gutiérrez-Aguirre, M. A., Cervantes-Martínez, A., & Coronado-Álvarez, L. (2008). Limnology of groundwater exposures with urban influence in Cozumel island, Mexico. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 30(2), 493-496.
- GWP (Global Water Partnership). (2014). *Technical Focus Paper - Integrated water resources management in the Caribbean: The challenges facing Small Island Developing States*. Estocolmo: Global Water Partnership.
- H. Ayuntamiento del Municipio de Cozumel Q. Roo. (2011). *Agenda 21, Isla de Cozumel*. Cozumel: Ayuntamiento de Cozumel.
- Hall, T. C., Sealy, A. M., Stephenson, T. S., Kusunoki, S., Taylor, M. A., Chen, A. A., & Kitoh, A. (2013). Future climate of the Caribbean from a super-high-resolution atmospheric general circulation model. *Theoretical and Applied Climatology*, 113(1-2), 271-287.
- Hassing, J., Ipsen, N., Clausen, T. J., Larsen, H., & Lindgaard-Jørgensen, P. (2009). *Integrated Water Resources Management in Action*. The United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- Ibisch R.B., Bogardi J.J., Borchardt D. (2016). Integrated Water Resources Management: Concept, Research and Implementation. En Borchardt D., Bogardi J., Ibisch R. (Eds.), *Integrated Water Resources Management: Concept, Research and Implementation* (pp. 3-32). Springer, Cham. Doi: 10.1007/978-3-319-25071-7_1.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Quintana Roo 2017*. Aguascalientes: INEGI.
- Kadi, M. A. (2014). Integrated Water Resources Management (IWRM): The international experience. En P. Martínez-Santos, M. Aldaya, & R. Llamas (Eds.), *Integrated Water Resources Management in the 21st Century: Revisiting the paradigm* (pp. 3-15). Londres: CRC Press/Balkema.
- Lesser, H., Azpeitia, J. & Lesser, J. M. (1978). Geohidrología de la isla de Cozumel, Q. Roo. *Recursos Hidráulicos*, 7(1), 32-49.
- López, C. A., Zambrano, L., Ruíz, O.R., Guzmán, M.A., Pérez, E. R., Sandoval, R., Hatch, K. G., Pineda, P.N., Pacheco-Vega, R., Caldera, A. (2017). *El agua en México. Actores, sectores y paradigmas para una transformación social-ecológica*. Ciudad de México: Fridrich-Ebert-Stiftung.
- Martínez-Santos, P., Aldaya, M., & Llamas, R. (2014). Integrated water resources management: State of the art and the way forward. En P. Martínez-Santos, M. Aldaya, & R. Llamas (Eds.), *Integrated Water Resources Management in the 21st Century: Revisiting the paradigm* (pp. 17-36). Londres: CRC Press/Balkema.
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). (2014). *Integrated water resources management*. Consultado el 12 marzo de 2020 en <https://www.un.org/waterforlifedecade/iwrm.shtml>.
- Palafox, A. & Gutiérrez, A. (2013). Cambio climático y desarrollo turístico. Efectos de los huracanes en Cozumel, Quintana Roo y San Blas, Nayarit. *Investigación y Ciencia*, 21(58), 36-46.
- Petit, O. (2016). Paradise lost? The difficulties in defining and monitoring Integrated Water Resources Management indicators. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 21, 58-64. Doi: 10.1016/j.cosust.2016.11.006.
- Quiroga García, B. A. & Romero Jiménez, M. del R. (2019). *Catálogo de estudios de las áreas naturales protegidas de Isla Cozumel (Volumen II)*. Cozumel: CONANP.
- Rivera, E., Villalobos, G. J., Azuz, I. & Rosado, F. (Eds.). (2004). *El manejo costero en México*. Campeche: SEMARNAT, CETYS-Universidad & Universidad de Quintana Roo.

- SECTUR (Secretaría de Turismo). (2013). *Estudio de Competitividad Turística del Destino Cozumel*. Quintana Roo: Universidad de Quintana Roo.
- SECTUR (Secretaría de Turismo). (2018). *Programa Marco para fomentar acciones para restablecer el balance del ciclo del agua en Cozumel*. Ciudad de México: Secretaría de Turismo.
- SENER (Secretaría de Energía). (2015). *Evaluación Rápida del Uso de la Energía*. Cozumel: Secretaría de Energía.
- Snellen, W. B., & Schrevel, A. (2004). *IWRM: for sustainable use of water 50 years of international experience with the concept of integrated water management*. Wageningen.
- Tercera Legislatura Constitucional del Estado de Quintana Roo. (Última reforma el 15 de junio 2017). Decreto Ley 14, Ley de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Quintana Roo. Publicada en el *Periódico Oficial del Estado de Quintana Roo*, el miércoles 6 de octubre de 1981. México.
- Tortajada, C. & Contreras-Moreno, N. (2005). Institutions for Water Management in Mexico. En C. Gopalakrishnan, C. Tortajada, & A. K. Biswas (Eds.), *Water Institutions: Policies, Performance and Prospects* (pp. 99-130). Springer Berlin Heidelberg.
- Uche, J., Martínez, A., Castellano, C., & Subiela, V. (2013). Life cycle analysis of urban water cycle in two Spanish areas: Inland city and island area. *Desalination and Water Treatment*, 51(1-3), 280-291.
- Van Der Zaag, P., & Savenije, H. H. G. (Eds.). (2014). *Principles of Integrated Water Resources Management*. Delft: UNESCO-IHE.

Anexo 8. Tercer artículo.

Ann. Limnol. - Int. J. Lim. 2021, 57, 16
© G. Hernández-Flores *et al.*, Published by EDP Sciences, 2021
<https://doi.org/10.1051/limn/2021013>

Available online at:
www.limnology-journal.org

RESEARCH ARTICLE

OPEN ACCESS

Historical analysis of a karst aquifer: recharge, water extraction, and consumption dynamics on a tourist island (Cozumel, Mexico)

Gerardo Hernández-Flores^{1,*}, Martha Angélica Gutiérrez-Aguirre¹, Adrián Cervantes-Martínez¹ and Ana Elizabeth Marín-Celestino²

¹ Universidad de Quintana Roo, Campus Cozumel, Avenida Andrés Quintana Roo, Calle 11 con calle 110 sur s/n. C.P. 77642. Cozumel, Quintana Roo

² Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. División de Geociencias Aplicadas, Camino a la Presa San José 2055, Col. Lomas 4ta Sección, San Luis Potosí, C.P. 78216. San Luis Potosí, Mexico

Received: 20 April 2021; Accepted: 18 July 2021

Abstract – On Cozumel Island, access to freshwater depends on the extraction of the resource from the aquifer located north of the island (catchment area). Water resource management on the island must be based on updated knowledge of the indicator dynamics related to the recharge of the aquifer, groundwater extraction and the distribution of the resource. In this study, trends, variations and time series of 30 years of monthly data for precipitation, temperature, evapotranspiration, and estimated aquifer recharge were calculated for the catchment area. Additionally, groundwater extraction, water consumption for the main uses over a 13-year period (monthly data), and the 5-year status of wells were considered. The results show decreasing trends in precipitation and estimated recharge volumes in the catchment area, in addition to increasing trends in mean air temperature, evapotranspiration, water extraction volumes and consumption by the commercial sector for the considered time periods. Additionally, an increase in dejected (77%) and reposed (38%) wells within the catchment area was observed. Evidence from this study suggests a dynamic behaviour of the analysed indicators over time that increases pressure on karstic, Caribbean aquifers for which monthly monitoring and data analysis are encouraged as the basis for adequate management.

Keywords: Aquifer sustainability / groundwater management / Mann Kendall trend test / time series / water consumption

1 Introduction

Coastal aquifers (CAs) are a valuable source of freshwater for the coastal environment well-being of over 60% of the global population that is concentrated around the shoreline (Zepeda *et al.*, 2018) and 11% that lives on islands (Mendoza-Vizcaino *et al.*, 2016). Aquifers near coastal areas are susceptible and sometimes unable to cope with the adverse effects of overextraction (Jaleel *et al.*, 2020; Zepeda *et al.*, 2018), sea water intrusion (Deng *et al.*, 2017), pollution (Hernández-Terrones *et al.*, 2011; Kammoun *et al.*, 2021), and climate change effects, such as rainfall pattern modification and sea level rise (Cashman, 2014; GWF, 2014; Hall *et al.*, 2013; Pulido-Velazquez *et al.*, 2018). Because of their nearness to the sea, CAs and island aquifers (IAs) share similarities, although IAs are unique in that they are confined to a geographical area. Also, IA territory may typically

correspond only to one country, and rainwater infiltration is the main source of recharge (Falkland, 1993), with most systems being just as complex as continental counterparts that require particular assessment for management (Gamble, 2004). These characteristics allow an IA to be an ideal model and scenario for research on aquifer recharge, groundwater withdrawals and water demand, which will contribute to further understanding IA dynamics as the basis for sustainable water management.

Cozumel is the third largest island in Mexico and the most populated island, located in the southeastern State of Quintana Roo, where the drinking water supply depends on the aquifer recharged only by rain (Gutiérrez-Aguirre *et al.*, 2008). Like in many other karstic nature islands, rainwater rapidly infiltrates into the aquifer, although they are highly vulnerable to pollution infiltration and water scarcity (Medici *et al.*, 2019, 2020). Vulnerability is an intrinsic property of karstic island aquifers, which depends on characteristics of the area and the sensitivity of the system to human and natural impacts (Ducci and Sellerino, 2013; Kačaroğlu, 1999; Medici *et al.*, 2021), such as wastewater infiltration, hurricanes and saltwater

*Corresponding author: gerardo.hernandez.flores@gmail.com

intrusions. Seawater intrusion can be a consequence from the reduction of the freshwater layer, as the piezometric level lowers by an increase in evapotranspiration and unsustainable water extraction volumes from wells (Villasuso *et al.*, 2011). Water scarcity on islands is a fundamental factor that limits population development and tourism (the main economic activity on Cozumel), and research is needed to promote the sustainable use of water (González *et al.*, 2020). In Mexico, federal water management is mostly performed by the National Water Commission (CONAGUA), and in Cozumel, the Potable Water and Sewerage Commission (CAPA) is the local agency for water management. CAPA is a governmental institution that monitors water quality indicators and administers the extraction, potabilization, and distribution of water withdrawn from a series of 264 wells located in the central-north region of the island (catchment area) (Tercera Legislatura Constitucional del Estado de Quintana Roo, 2017). Water management in the catchment area is focused on selecting the most suitable wells, according to their water quality indicators, for extraction, and infrastructure maintenance.

Similarly, central gestion related with the water management is applied in other tropical, karst islands (based almost exclusively upon static indicators), then it could be complemented by identifying the dynamics of indicators related to groundwater recharge (precipitation, evapotranspiration, estimated aquifer recharge) and withdrawals (groundwater extraction, the state of wells, and water consumption volumes) as part of an integrative approach to sustainable aquifer management. An integrative approach allows the synthesis and analysis of information about the aquifer dynamics, being an excellent resource for users, stakeholders and managers of information about past trends and current status to encourage practices that promote aquifer sustainability. The use of test for trends, boxplots, and time series are common statistical tools for analysing variations over a time period, which allow us to identify an increase or decrease in values, seasonality and outliers (Neeti *et al.*, 2012; Nwogu *et al.*, 2016). Mann-Kendall test is recommended by the World Meteorological Organization and has been used by several authors for evaluating the trend in climatic, hydrological and water resources data (Jaiswal *et al.*, 2015). Although these tools have not yet been used fully to analyse information previously for Cozumel, there are examples of their implementation in other studies for the Yucatan Peninsula (Bautista *et al.*, 2009; Herrera-Silveira *et al.*, 2002; Rodríguez-Huerta *et al.*, 2019a, 2019b).

Current water management information on precipitation and recharge are generally annual and are sometimes not updated in tropical latitudes, a situation that is shared with information on aquifer withdrawals and distribution, and that contributes to the assumption of indicators static behaviour. This study hypothesizes that the indicators associated with the aquifer are dynamic and subject to variations over time, for which they must be monthly updated and analysed for a better understanding of their current state. The objective of this study is to analyse the dynamics of indicators as precipitation, air temperature, evapotranspiration used in estimated aquifer recharge, water withdrawals and distribution in different time periods for Cozumel. This analysis helped to identify variations over time in the hydrometeorological indicators (precipitation and temperature) related to aquifer estimated

recharge and hydrological indicators (the exploitation of resources and distribution) on the island to understand the current situation and contribute information to the sustainable management of water resources.

2 Materials and methods

2.1 Study area

Cozumel (20°16' – 20°26'N and 86°44' – 87°02'W) is a karstic island in the Caribbean, located 20 km from the East Coast of the Yucatan Peninsula with a surface area of 477 km² and a maximum length of 48 km from north to south and 14.8 km from east to west (Gompper *et al.*, 2006; Orellana *et al.*, 2007). The territory has slight slopes with an average elevation of 5 m; the highest elevation (10 m) is located in the south-center region (Fig. 1) (Ward, 1997). The island is formed by limestone, where most of the soils are Leptosol, with a few patches of Gleysol in the centre-east and Arenosol near the coast of the southeast (Gutiérrez-Aguirre *et al.*, 2008; INEGI, 2013). The climate is classified as warm subhumid (Aw) according to the Köppen system, with temperatures ranging from 23 to 27.5 °C (García-Gómez *et al.*, 2014; Orellana *et al.*, 2007). The annual average precipitation is divided, being 1400–1500 mm on most of the island and 1300–1400 mm on the far northeast, with a rainy season from June to December and a dry season from January to May (García-Gómez *et al.*, 2014; Orellana *et al.*, 2007).

2.1.1 Vegetation, soil and bedrock geology

Vegetation is composed mainly of subdeciduous tropical forest, subdeciduous low tropical forest and mangroves (Escalante, 1996; Téllez *et al.*, 1989), covering approximately 90% of the island surface with native species as: *Manilkara zapota*, *Bursera simaruba*, *Enriquebetrania crenatifolia*, and *Pithecellobium menguense* (Vázquez-Domínguez *et al.*, 2012). In the analysed UGA C1 (Fig. 1), most of the surface is medium forest (Escalante, 1996).

The island soilscape is composed mainly of shallow soils, which are found as patches that fill cracks in the rocks (Bautista *et al.*, 2011; CONAGUA, 2015). Karst environments with similar characteristics have soil depths from 4–15 cm, where most of the fertility is found in the uppermost part of the horizons and depends on the decomposition of organic matter (Flores-Delgado *et al.*, 2011; Holden *et al.*, 2019). The island was developed in the late Mesozoic and Cenozoic via block faulting from Yucatan Peninsula, with two periods of submergence and two periods of exposure on the late Pleistocene (Gompper *et al.*, 2006; Ward, 1997). Cozumel is part of the "Carrillo Puerto" formation which developed between Eocene and mio-Pliocene (CONAGUA, 2015). The lithology is structured as four units (Fig. 1), Cozumel Formation and three more recent units, named: Mirador, Abrigo and Chankanaab Formations (Lesser *et al.*, 1978). The youngest rocks date from the Quaternary and are composed mainly of calcarenites, gravels, calcareous sands and fragments of shells deposited alongside the shore thought the island, except for most of the west side (Richards, 1937; SECTUR, 2018). The island constitutes the emerged part of a structural pillar (horst), limited by two large normal faults

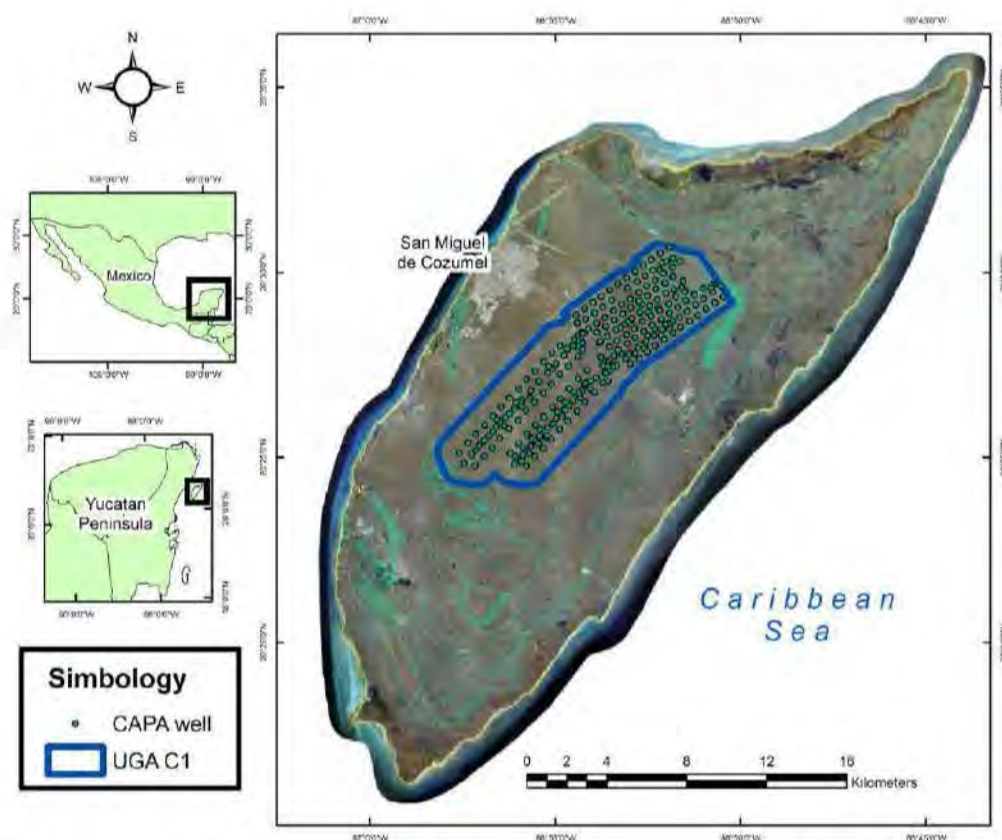


Fig. 1. Location of CAPA wells, UGA C1, elevations and stratigraphy column on Cozumel Island. Modified of Local Ecological Zoning Plan (2008).

parallel to the eastern coast of the Peninsula, and where three structural elements make up the island: Eastern normal fault, Western normal fault, and Cozumel Anticline (CONAGUA, 2015).

2.1.2 Hydrology

Since 1978, the aquifer has been characterized as a freshwater lens, for most of the territory subsurface, that floats over seawater and has a water table from 1 m on the east to 5 m on the centre-south (Hernández-Flores *et al.*, 2020; Lesser *et al.*, 1978). This freshwater lens model corresponds with the Ghyben-Herzberg principle, which states that the thickest part of the lens is in the centre and thins as it approaches the shoreline, where it naturally discharges into the sea mostly by underwater springs (Gamble, 2004; Sánchez y Pinto *et al.*, 2015). The aquifer is described as nonconfined, highly permeable, heterogenous due to the hydraulic properties and

irregular terrain distribution caused by the dissolution of the rock (SECTUR, 2018). The island has a typical karstic topography with the presence of sinkholes (cenotes) as a result of dissolution processes (Lesser *et al.*, 1978). An infiltration of 6% of total rainfall is considered and surface runoff is negligible because of the karstic nature of the area (Wurl *et al.*, 2003). Water quality on the aquifer is very similar to the one in the Yucatan Peninsula, being of a $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ type as a result of the dissolution of limestones (anhydrite and halite) (CONAGUA, 2015; Escolero *et al.*, 2005; Richards, 1937). The main source of recharge is rainwater infiltration, and due to orography, the main catchment area is located at the centre, slightly to the northeast (Frausto-Martínez *et al.*, 2018), concurring with UGA C1. In this area, wells from CAPA extract water from the thickest freshwater lens on the island (SECTUR, 2018). According to the Local Ecological Zoning Plan (POEL), these wells are within 68.85 km² and make up Environmental Management Unit C1 (UGA C1), which has the

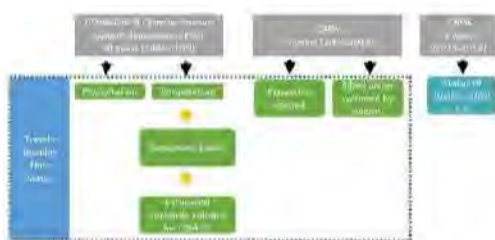


Fig. 2. Schematic framework of the methods used in this research. In grey, information sources and considered time periods. Green indicates hydrometeorological and hydrological indicators. In dark blue, analysis performed to indicators. In blue cyan, information represented in maps. Orange arrows represent indicators that were calculated.

purpose of preserving the natural cover to ensure aquifer water quality and quantity. To prevent issues from water depletion in wells, an approximate of 2.3 million m³/year safe water yield was estimated in 1978 (Lesser *et al.*, 1978).

2.2 Methodology and data collection

For this study, three sets of data from different time periods were analysed (Fig. 2). These time periods were considered based on the availability of the information.

Monthly information from hydrometeorological indicators (total precipitation and mean temperature) from 30 years (1989 to 2019) was provided by the National Water Commission (CONAGUA) from meteorological station DGE 00,023,048 (20.5100° N – 86.9461° W) into the study area. Although most of the readings from the meteorological station were available, some of them were missing due to technical problems. Missing monthly data were obtained from the Climate Forecast System Reanalysis (CFSA) reports from The National Centers for Environmental Prediction (NCEP) with the meteorological station located at 20.583° N, – 86.817° W. Precipitation data corresponded to monthly total mm and temperature data corresponded to mean temperature values.

Monthly water hydrological indicator data (extraction volumes from wells at UGA C1 and distribution volumes to different sectors) were provided by CAPA for a 13-year period (2005 to 2018), along with annual well status for 5 years (2013–2018). According to local regulations (Tercera Legislatura Constitucional del Estado de Quintana Roo, 2017), CAPA is allowed to distribute water for the following uses by sector: commercial, domestic, general services, hotels, industry and aquatic parks, with the latter nonexistent in Cozumel.

2.3 Evapotranspiration

Evapotranspiration was estimated by the Thornthwaite method (Tw), a monthly temperature-based method that has been used for estimating evapotranspiration in previous studies for the Yucatán Peninsula (Bautista *et al.*, 2009; Delgado *et al.*, 2011).

Tw can be used in locations where environmental data are limited and to identify monthly variations over a period of time (Bautista *et al.*, 2009). For this study, data from CONAGUA, CFSA, and theoretical sunshine hours for each month from Allen (Allen *et al.*, 1998) were used to estimate monthly evapotranspiration (ET₀) from 1989 to 2019 according to the formula (Formula (1)) described by the Thornthwaite method (Thornthwaite, 1948).

$$ET_0 = 16 + \left(\frac{10 * T_m}{I} \right)^0 * \frac{N}{12} * \frac{n}{30} \quad (1)$$

where T_m is the mean air temperature for each month (°C), I is the annual heat index $\sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_m}{5} \right)^{1.514}$, $\alpha = 6.7512 * 10^{-7} * I^3 - 7.711 * 10^{-5} * I^2 + 1.7921 * 10^{-2} * I + 0.49239$, N are the theoretical sunshine hours for each month considering a latitude of 20° in the Northern Hemisphere (Allen *et al.*, 1998), and n is the number of days per month.

2.4 Estimated recharge

The aquifer recharge in Cozumel was calculated according to the following assumptions: (1) the whole UGA C1 surface contributes to recharge, (2) the whole area of UGA C1 is considered conserved and thus perturbations are not accounted for, and (3) the maximum soil moisture capacity (STC) is evenly distributed on UGA C1. Estimated recharge is considered the potential aquifer recharge, defined as the part of precipitation that infiltrates below the root zone (Pulido-Velazquez *et al.*, 2018). It occurs when soil moisture is at the STC and monthly precipitation (P_i) exceeds monthly evapotranspiration (ET_{0i}), as stated in equation (2) (Alley, 1984; Rodríguez-Huerta *et al.*, 2019a).

$$\Delta R = \begin{cases} (P_i - ET_{0i}) - (STC - S_{i-1}) & \text{for } P_i \geq ET_{0i} \text{ and } S_i = STC \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

where P_i represents precipitation for each month, S_i the available soil moisture for each month, S_{i-1} is the soil moisture quantity of the previous month, and $STC = 224$ mm as estimated by Rodríguez-Huerta *et al.* (2019a) for Cozumel Island. STC is calculated by multiplying the soil available water capacity and root depth of vegetation. Recharge volume calculations started in September 1989 due to the elevated precipitation value, thus considering $S_i = STC$ for that month. Because of this, estimated recharge calculations for every month in 1989 were not possible, for which this year was not considered in the analysis. Monthly estimated recharge volumes for UGA C1 were obtained by multiplying recharge values (ΔR) by the UGA C1 area (68.85 km²).

2.5 Data analysis

2.5.1 Trend estimation

Prior to Mann-Kendall trend analysis, one of the requirements is the absence of autocorrelation in the data

(Helsel and Hirsch, 2002; Modaresi *et al.*, 2016), which occurs when observations are strongly correlated with each other between a data point and its adjacent point (Helsel and Hirsch, 2002). To identify the presence of autocorrelation, individual indicator data sets were tested for the autocorrelation coefficient (r_1) by formula (3) (Shewhart and Wilks, 2016):

$$r_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (X_i - \bar{x}) * (X_{i+1} - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

where n is the total number monthly registrations for each variable, X_i represents a value in the data series, X_{i+1} represents the following value from X_i and \bar{x} is the average for the given variable.

And the 95% confidence intervals were estimated:

$$r_1(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96\sqrt{n-2}}{n-1} \quad (4)$$

If the estimated r_1 value fell between the r_1 (95%) intervals, then the data were considered serially correlated (Ahmad *et al.*, 2015).

2.5.2 Mann-Kendall test

This test has been used and recommended by the World Meteorological Organization for evaluating trends in climatic, hydrological and water resource data (Jaiswal *et al.*, 2015). Trends allow us to visualize whether data have a tendency to increase, decrease or stay static over time and can be estimated by the nonparametric Mann-Kendall test (MKt) (Chen *et al.*, 2015; Emeribe *et al.*, 2019; Hussain *et al.*, 2015). MKt is calculated by comparing for a negative or positive difference in consecutive pairs of data values in the data set, without considering the magnitude of the difference (Rosmann *et al.*, 2016). In this study, MKt was performed on every indicator dataset for trend estimation because a normal distribution of data is not required, and outliers (such as extreme precipitation events) do not affect the result (Ahmad *et al.*, 2015; Jaiswal *et al.*, 2015). In this test, no trend corresponds to the null hypothesis, and a positive or negative trend corresponds to the alternate hypothesis. A Z value of 0 corresponds to no trend, a positive Z value to an increasing trend and a negative Z value to a decreasing trend (Goicic and Trajkovic, 2013). This method allows to identify the overall upward, downward or static behaviour of values from a time series. To estimate the number of positive differences minus the number of negative differences (S), the variance of S or $VAR(S)$, and the MKt statistic (Z), equations (5)-(7) were used (Phuong *et al.*, 2019; Rosmann *et al.*, 2016).

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n \text{sig}(X_j - X_i) \quad (5)$$

$$\text{sig}(X_j - X_i) = \begin{cases} +1 & \text{if } X_j - X_i > 0 \\ 0 & \text{if } X_j - X_i = 0 \\ -1 & \text{if } X_j - X_i < 0 \end{cases}$$

$VAR(S)$ was estimated by equation (6),

$$VAR(S) = \frac{1}{18} [n * (n - 1) * (2n + 5)] \quad (6)$$

and Z was calculated with equation (7)

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{VAR(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{VAR(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (7)$$

where n is the total number of monthly registrations for each variable, X_i represents a value in the data series and X_j represents the following value from X_i .

Although Z value might indicate an increasing or decreasing trend, in order for it to be significant, trend test should be done at specific significance levels. For this study a 95% significance was used with a considered critical value of 1.96 for $Z_{1-\alpha/2}$ (Ahmad *et al.*, 2015; Goicic and Trajkovic, 2013). The estimated value of Z corresponds to a significant positive or negative trend as long as the calculated value of Z is greater or lower than the interval between 1.96 and -1.96 ; otherwise, no significant trend is assumed (Ercan and Yüce, 2017; Yadav *et al.*, 2014).

2.5.3 Sen's slope

To take into account the magnitude of the difference in trends, Sen's slope estimation method was used (Rosmann *et al.*, 2016). This method pairs all the values from a time series and estimates their slope, then uses the median from these slopes to calculate an overall slope, as described by equation (8) (Hussain *et al.*, 2015):

$$T = \frac{x_j - x_k}{j - k} \quad \text{for } j, k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (8)$$

where x_j and x_k are data values at times j and k ($j > k$), respectively. Increasing and decreasing trends correspond to positive and negative signs from the estimated slopes (Phuong *et al.*, 2019).

2.5.4 Box plots

Boxplots are a useful and concise visual representation of a data set, providing graphical displays of the presence or absence of unusual values (outliers), skewness (relative size of box halves), variation in spread (interquartile range or box height) and centre of data (median or the centreline of the box) (Helsel and Hirsch, 2002). Boxplots were used to identify annual variations in data sets from each indicator data set (Modaresi *et al.*, 2016; Saadat *et al.*, 2013; Toews *et al.*, 2007) by considering the data for each of the twelve months within the considered time period of each time series (example: all precipitation values for January from 1989 to 2019). Seasonality can be visually identified by the position of the centre from each box (median for every month), mean and median from the previous and next boxes. Seasonal values have a generalized annual cycle (Toews *et al.*, 2007) and

Table 1. Descriptive statistics and results for the autocorrelation function (r_1) ($\alpha = 0.05$).

	Units	Series length	n	Mean	Max	Min	StDev	Skewness	Kurtosis	r_1
Monthly precipitation	mm	1989–2019	372	142	762	0	133	1.79	4.24	0.31 ^a
Mean monthly temperature	°C	1989–2019	372	27	33	23	2	0.10	-0.49	0.83 ^a
Evapotranspiration	mm	1989–2019	372	164	380	71	60	0.91	0.99	0.84 ^a
UGA Recharge	m ³	1990–2019	360	1,482,705	39,971,599	0	4,940,640	-4.56	24.59	0.27 ^b
Extracted water	m ³	2005–2018	168	345,807	436,806	227,849	37,873	0.32	0.05	0.78 ^c
Commercial	m ³	2005–2018	168	36,989	50,208	21,419	4,150	-0.02	1.36	0.67 ^c
Domestic	m ³	2005–2018	168	177,105	209,459	111,361	13,636	-0.99	2.93	0.42 ^c
General Services	m ³	2005–2018	168	9,497	12,980	5,439	1,358	0.02	0.45	0.50 ^c
Hotels	m ³	2005–2018	168	30,564	6,636	56,516	7,663	0.16	0.93	0.63 ^c
Industry	m ³	2005–2018	168	167	655	26	145	1.54	1.87	0.65 ^c

n : total number of registrations for each variable.

^a r_1 (95%) = 0.099 and -0.104.

^b r_1 (95%) = 0.10 and -0.106.

^c r_1 (95%) = 0.145 and -0.157.

usually show an annual pattern with values of a similar behaviour that allows groups to be formed (Saadati *et al.*, 2013).

2.5.5 Time series

Time series were elaborated for monthly precipitation, mean temperature, evapotranspiration, estimated recharge volume, water withdrawal and sector distributions. Extreme precipitation events are indicated by precipitation and estimated recharge time series. Time series are sequential observations over time and a valuable method to visually identify trends and the overall behaviour of data (Neefti *et al.*, 2012).

2.6 Well status

Information about the status of CAPA wells from 2013 and 2018 is represented within maps. Based on their current status, CAPA classifies wells as (1) active, operating wells without volume and quality issues for extraction; (2) repose, temporarily out of service wells due to exceeding chloride by law levels; and (3) dejected, wells out of operation due to unfavorable water quality for extraction. This status description was based only on data provided by CAPA.

2.7 Statistical software

Time series, Sen's slope test and boxplots were elaborated and estimated by the software MINITAB vs. 18.

Maps were drawn using Geographic Information System software QGIS vs. 3.12.

3 Results

Cozumel is a karstic island that was formed by the uplift of the seabed (Spaw, 1978); thus, few slopes and a low maximum altitude are present. A microbasin has formed naturally in the north-centre due to small elevations (4–5 m) and slightly higher elevation (7.5–11 m) in the far north and along the

perimeter of the coastline in the east (Fruasto-Martínez *et al.*, 2019). Due to the low elevation on the island, most of the rainwater can infiltrate to the porous medium, or through sinkholes. On average, the island has 0.01% of gradient which is a consequence of the high transmissivity produced by high karstification (Sánchez y Pinto *et al.*, 2015). These characteristics favour the channeling, storage and infiltration of rainwater in the north-central zone where UGA C1 is located, in addition to being the location of the greatest freshwater lens on the island. However, high permeability of karstic systems also increases vulnerability to pollutant infiltration and does not prevent issues from over extraction like seawater intrusions (Medici *et al.*, 2019, 2020).

3.1 Trend analysis

Descriptive statistics for all considered indicators are shown in Table 1. The result of the autocorrelation function (r_1) estimated that none of the analysed indicators had autocorrelation and therefore were suited for the Mann–Kendall trend test.

The results for Z show statistically increasing trends for monthly temperature, evapotranspiration, extracted water, commercial, and general services, while a statistically decreasing trend was found for precipitation, estimated UGA C1 recharge, and industry. Although a significant trend was not found for domestic ($Z = -0.59$) and hotels ($Z = -0.71$), a slight negative trend was found for both indicators in their trend magnitude (-12.87 and -9.31 , respectively) (Tab. 2).

3.2 Seasonality

Seasonality was observed in precipitation values, where the mean peak values were identified from September through November and lower values were identified from February and March (Fig. 3a). For mean temperature and evapotranspiration, mean peak values were in July and August (Fig. 3b, c). The estimated recharge in UGA C1 showed October and November as the months with the greatest mean values and outliers. A slight seasonal increasing effect of water consumption was

Table 2. Results from MKt and Sen's slope. Estimated trends are significant with an $\alpha=0.05$.

	Trend	S statistic	VAR (S)	Z	Sen's slope
Monthly precipitation	Decreasing	-6663	5742833	-2.780	-0.120
Mean monthly temperature	Increasing	17697	5742833	7.384	0.007
Evapotranspiration	Increasing	13728	5742833	5.728	0.159
UGA recharge	Decreasing	-6704	5205500	-2.938	0
Extracted water	Increasing	6519	531505	8.940	498.312
Commercial	Increasing	5276	531505	7.236	41.966
Domestic	No trend	-432	531505	-0.591	-12.877
General Services	Increasing	4325	531505	5.931	11.969
Hotels	No trend	-522	531505	-0.715	-9.313
Industry	Decreasing	-2505	531505	-3.435	-0.457

$Z_{1-\alpha/2}=1.96$ and -1.96 .

observed in the first three months for commercial services, general services and hotels.

3.3 Precipitation and temperature

A sudden increase in mean temperature can be observed in the last 8 years. In July 2012, a monthly mean temperature of 30 °C was recorded for the first time in the analysed period, but the highest environmental temperature of 32.5 °C were recorded in 2016 and 2017. Since 2013, the highest records remain over 30 °C on Cozumel Island (Fig. 4b). Extreme precipitation events on October 1998, 1999, 2005, and 2011 correspond temporally to hurricanes Mitch, Katrina, Wilma and Rina, respectively.

3.4 Evapotranspiration

Evapotranspiration calculated by the Thornthwaite method is based on monthly temperature values, so a behavior similar to that in mean monthly temperature is expected. Evapotranspiration showed a mean monthly value of 164.6 mm (Tab. 1) and an increasing trend with a slope magnitude of 0.159. In Cozumel, few studies have reported evapotranspiration values, some of which estimate evapotranspiration to be up to a 75% of yearly precipitation (Wurl *et al.*, 2003), and others as much as 568.73 Mn³/year when estimated by the Turk method (CONAGUA, 2015). An increase in values from July 2012 can be observed, reaching its maximum in July 2017, with a value of 380 mm (Fig. 5).

3.5 Estimated recharge

An increasing trend for the frequency of hurricanes and tropical storms in the Caribbean is expected for the next years (Taylor *et al.*, 2012). There appears to be a relation between recharge and extreme precipitation events, as seen in Figure 6. Although hurricanes and tropical storms are associated with an important increase in precipitation volumes (Vosper *et al.*, 2020), the volume of rainfall contributed seems to depend on the behavior, characteristics and intensity of the climatic event. The results from Figure 6 show a reduction in the contribution of tropical storms and hurricanes to the estimated recharge

volume in the last two decades compared to 1990s. Partly because rain is not the only factor that influences, recharge is the set of several factors, such as aquifer geological composition, soil storage capacity, and evapotranspiration.

3.6 Water extraction from UGA C1 and consumption by sector

The increased extraction volumes from wells are related to population growth and economic development on the island in the last 30 years, as economic growth and urbanization raise the demand for water (Rodríguez-Huerta *et al.*, 2019b). The average monthly extraction volume was 345,807 m³ (Tab. 1), with the highest volume (436,806 m³) recorded in October 2015, followed by a decrease in extraction volumes (Fig. 7). The number of people living on the island in 2005 was 73,193 (Ayuntamiento Presidencia Municipal Cozumel, 2015) while in 2017 it was 93,477 (SEDETUS, 2019); therefore, the annual population growth rate for that period of time was 2.1%. Individual water consumption graphs on Fig. S1; for commercial use, Fig. S2; general services, Fig. S3; industry, Fig. S4; hotels, and Fig. S5; domestic can be consulted as Supplementary material.

Special attention should be paid to the difference in the total volume of water extracted and the sum of consumed water by all sectors from 2005 to 2018. This difference resulted in a mean monthly volume of 1,098,000 ± 352,329 m³, which represents an average 26% of the total extracted volume from wells for the estimated time period. Part of this missing water volume might be attributed to leaks due to deficiencies in the distribution infrastructure. Water leaks are a serious problem in many places, some of which represent 37% of the total distributed volume for Mexico city (CEMDA, 2006) or up to 15% for some parts of the United States (Raei *et al.*, 2019).

According to information from this study, a total of 58,095,509 m³ of water was extracted from CAPA wells, and a total of 139,570,864 m³ were estimated as recharge for UGA C1 from 2005 to 2018, meaning that for that period, 41.6% of the recharged water volume was extracted from UGA C1 by CAPA. It should be noted that this represents only the extracted volume from wells and aquifer volume reductions by evapotranspiration and underground springs should be considered on further studies.

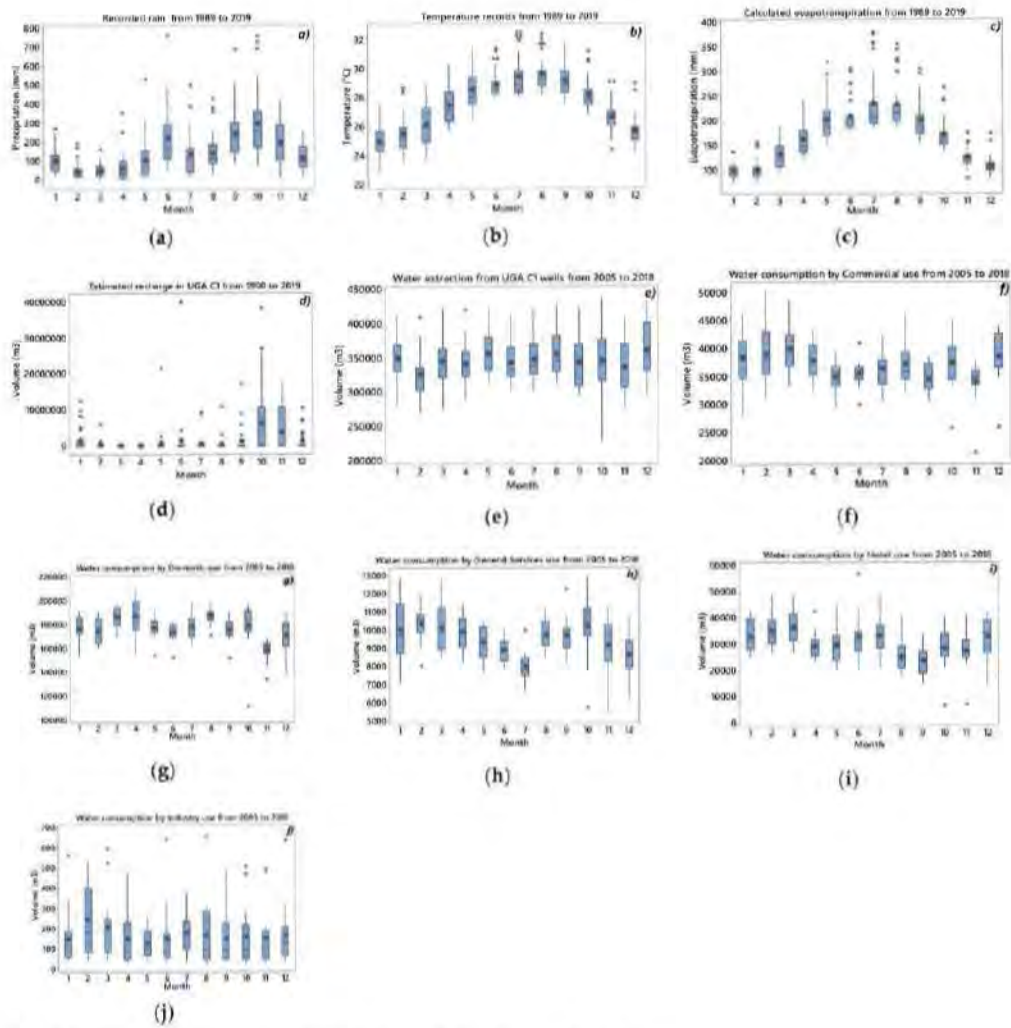


Fig. 3. Monthly annual variations in each indicator within their analysed time period.

3.7 Status of wells

The status of wells from CAPA in UGA C1 is deteriorating (Fig. 9a and b) as can be seen by an increase in the status of dejected (from 31 to 55) and the status of repose (from 34 to 47) wells from 2013 to 2018. Within analyzed time period, dejected wells increased in the extreme south-east, as well as in the extreme northeast of the UGA C1. On the other hand, deposed wells increased mainly within the area near the center of the UGA C1, surrounding the highway. In order to remedy

well deterioration, important active strategies must be developed to reestablish the freshwater lens in each well (Zepeda *et al.*, 2018).

Current information about well status is based only on information provided by CAPA; thus, further field research to confirm the actual status of wells must be performed. On the island, well infrastructure may be vandalized resulting in removed supplies such as electrical cables and water pumps or direct damage to distribution pipes within the UGA C1. In addition, the lack of maintenance on the roads to the wells can

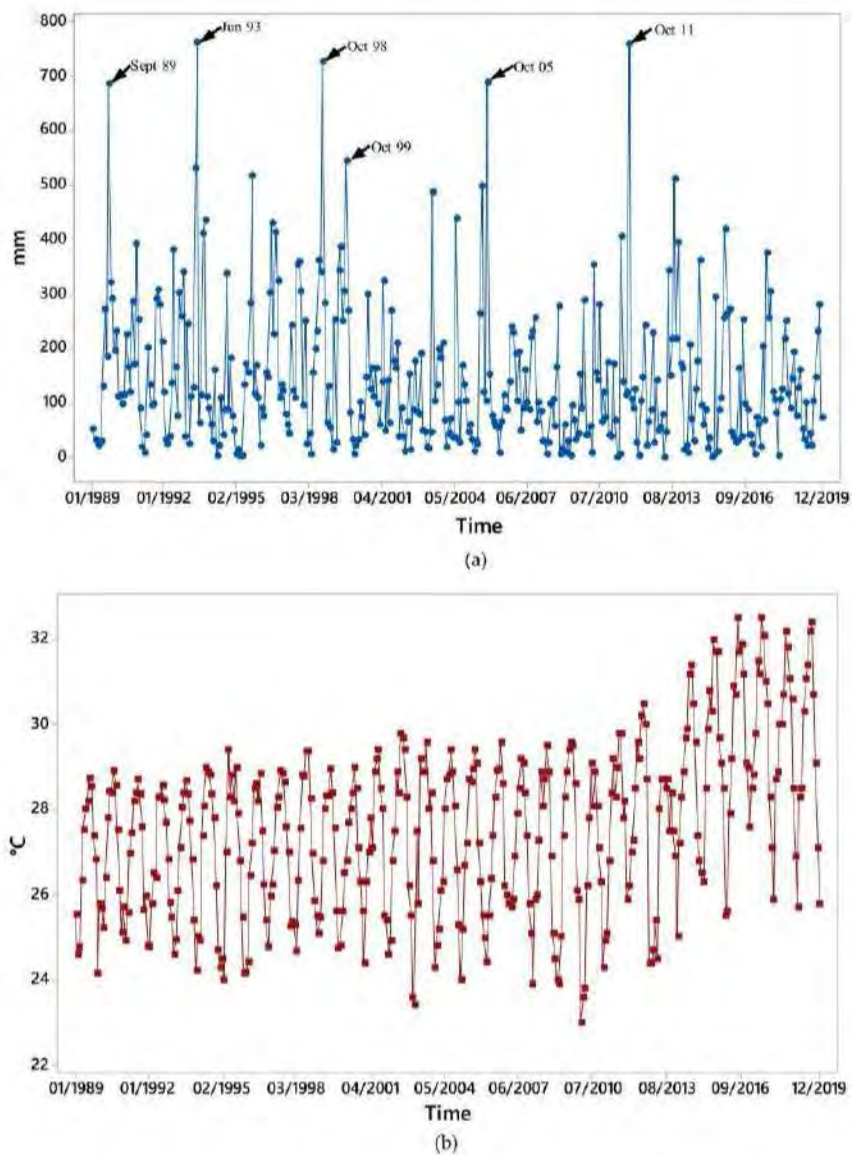


Fig. 4. Monthly precipitation (a) and mean temperature (b) registered in Cozumel from 1989 to 2019.

difficult well water sampling due to vegetation overgrowth. These infrastructure situations should be considered to complement the current water quality-based status of wells, in order to develop more integrative maps from the current state of the wells within the UGA C1.

4 Discussion

Elevated indicator values (>1) of kurtosis and skewness from precipitation and estimated recharge were observed in Table 1. Although most of the analyzed months registered

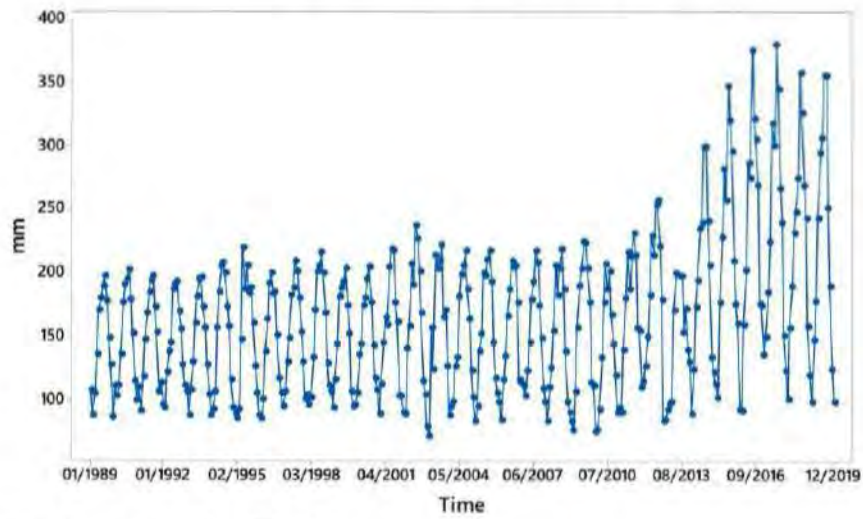


Fig. 5. Estimated Evapotranspiration from 1989 to 2019.

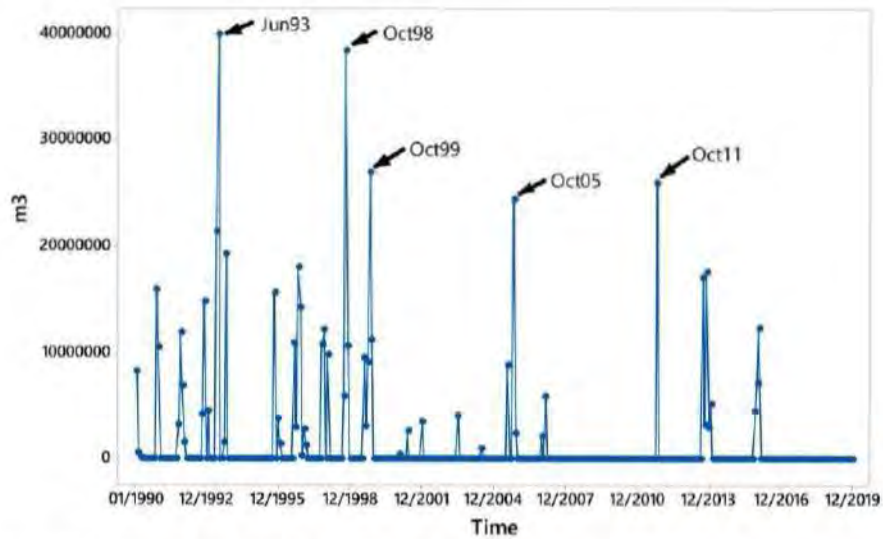


Fig. 6. Estimated aquifer recharge for Cozumel from 1990 to 2019.

some precipitation volumes, the majority of them were close to zero. Similar to what happened with precipitation, estimated recharge would not occur with low rainfall volumes, which resulted in the clustering most of the indicator values in zero or close to zero due to the low number of recharge events. This influenced data distribution of indicator values resulting in elevated kurtosis and skewness values.

4.1 Climate trends

On Cozumel, the low terrain elevation (4–5 m) surrounded by slightly higher elevations (7.5–11 m) structures a naturally formed basin (Frausto-Martínez *et al.*, 2019). Water infiltration is enhanced by the geohydrological setting, allows the presence of one aquifer within this basin. Similar structure,

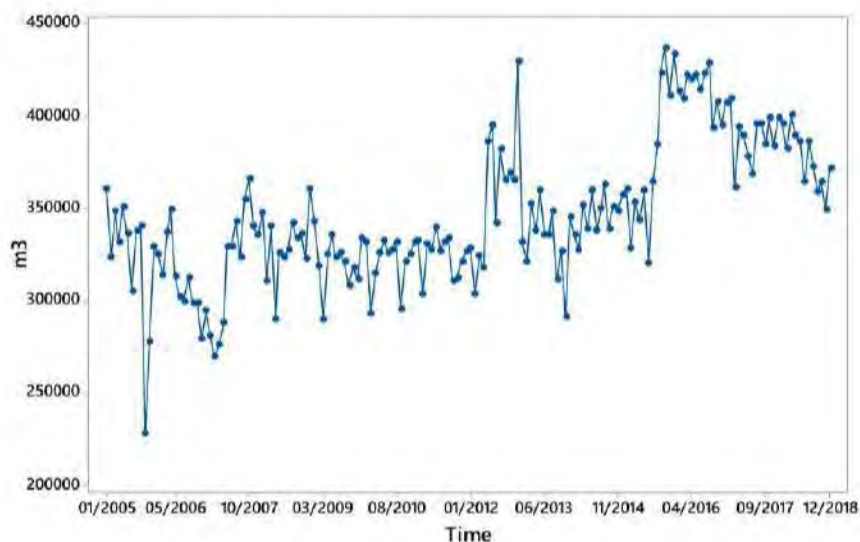


Fig. 7. Monthly water extraction volume from CAPA wells from 2005–2018.

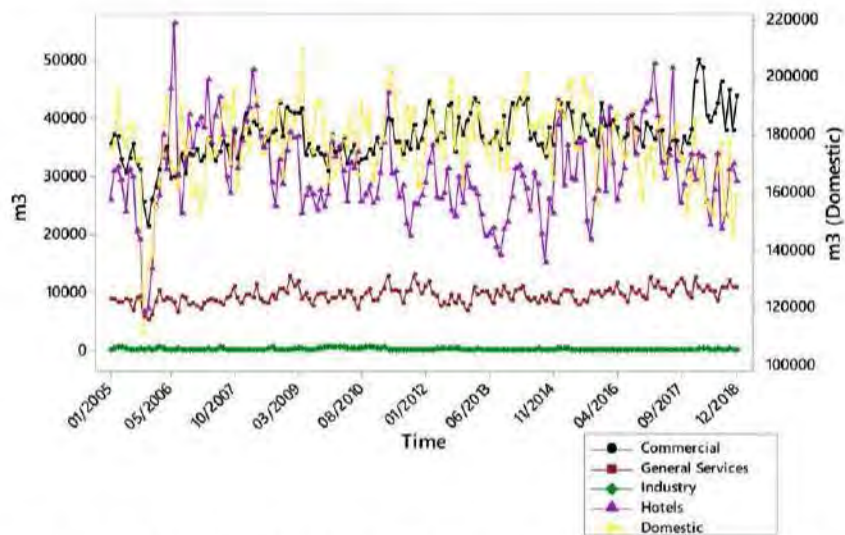


Fig. 8. Monthly water consumption from different sectors from 2005–2018. The secondary axis corresponds to the domestic water consumption volume.

and geologic characteristics can be identified on Caribbean islands, such as western Cuba, north-central Jamaica and northwestern Puerto Rico (Doerr and Hoy, 1957), where the geohydrology allows the maintenance of an aquifer.

The aquifers of these Caribbean karst islands are also subject to high vulnerability, where water supply and drought are considered major sustainability issues (Day, 2010; Len and Parise, 2009). To address them, the complexity and particularities

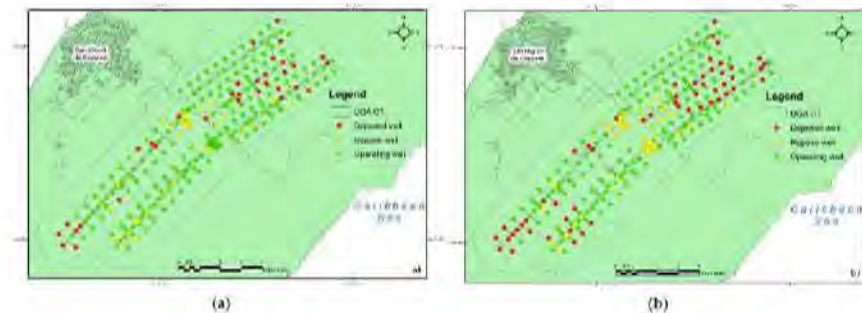


Fig. 9. Location and status of CAPA wells from 2013 (Fig. 9a) and 2018 (Fig. 9b).

of each groundwater system needs to be considered for their adequate management (Kačiroğlu, 1999). Although the analysis of hydro meteorological dynamics is vital due to precipitation being the main source of recharge for these aquifers. Therefore, trend analysis of information from the past years is a resourceful way to understand the behavior of the indicators and their current situation, as the basis for the development and update of water management strategies. The analysis presented on this study could be used to complement water management studies on islands with similar geohydrological settings, where hydro meteorological information may be scarce.

The seasonality allows to identify yearly patterns within an indicator data set. Seasonality, as seen on Figure 3a and b, for precipitation and temperature correspond with literature reports for both rainy and dry tropical seasons (SECTUR, 2018). The monthly average precipitation was 142 mm (Tab. 1), and total monthly precipitation showed decreasing trend ($Z = -2.78$). Because rain is the only source of fresh water to Caribbean karstic aquifers, a decrease in its volume directly impacts recharge volumes. When compared to previous years, a remarkable decrease of intense precipitation events from October 2011 to December 2019 (Fig. 4a) can be identified. Even though an increase in hurricanes and tropical storms is expected due to climate change in the Caribbean (Vosper *et al.*, 2020), their effect on intense precipitation volumes in Cozumel has yet to be studied. Most of the available hydro meteorological trend studies do not focus on Cozumel but are meant for the Yucatan Peninsula area. These studies suggest an overall regional decreasing trend in precipitation (Castro-Borges and Mendoza-Rangel, 2010; De la Barrera *et al.*, 2020; Rodríguez-Huerta *et al.*, 2019b), although there is evidence of an increase in some locations of the Yucatan Peninsula, such as Ria Lagartos (Yucatan State) and Escárcega (Campeche State) (Neeti *et al.*, 2012). This information suggests that despite the expected regional decreasing trend in precipitation, there may be a different precipitation behaviour on a local scale, thereby emphasizing the importance of specific studies for areas such as Cozumel.

Previous studies indicate that small islands do not have the sufficient conditions to create their own weather as continents do, which makes them particularly vulnerable to changing

weather conditions (Gamble, 2004). The variation on hydro meteorological indicators could affect water availability on islands of the Caribbean, due to the dependence of rainwater infiltration dynamics for aquifer recharge (Falkland, 1993). For the Caribbean, climate projections estimate a 0.7–4 °C temperature increase and a 10–30% precipitation decrease, although these variations are not expected to be homogeneous, with differences within the region according to time and location (Cashman, 2014). Therefore, there is a need to identify changes and update the dynamics of the variables associated with aquifer recharge, as they are the basis for estimating other indicators for the sustainable management such as aquifer volume and aquifer safe yield.

An increasing trend on monthly temperature was observed (Tab. 2); at present, CONAGUA reports an average annual temperature of 24.7 °C for Cozumel (CONAGUA, 2015), monthly temperature analysed here showed a mean value of 27.5 °C (Tab. 1); although the results from Sen's Slope test show a minimum magnitude increase, an important increase in monthly temperatures can be seen starting from July to September (2012) and follow through next seven years. Because Sen's slope was estimated for the monthly 30-year period, this increase might not be reflected in the magnitude. The rising mean temperature fits reports from previous studies where an increase in temperature for the Yucatan Peninsula and the Caribbean was predicted and identified (Castro-Borges and Mendoza-Rangel, 2010; De la Barrera *et al.*, 2020; Rodríguez-Huerta *et al.*, 2019a).

In Mexico, the modification of precipitation and temperature patterns due to climate change is expected (De la Barrera *et al.*, 2020), although weather variations in the Caribbean can also be associated to "el niño" and "la niña" (Reguero *et al.*, 2013). Due to this variability, uncertainty in possible future outcomes is expected; therefore constant monthly monitoring and information analysis for detailed water balance studies on islands is needed (Falkland, 1993).

Studies have reported that an increase in evapotranspiration and a decrease in precipitation are associated with a decrease in vegetation (Dimpashoh *et al.*, 2011). Further studies are encouraged to evaluate the fluctuations in evapotranspiration values and their effect on vegetation density or variety on the island.

4.2 Recharge and economic issues

Previous estimations of recharge volumes have been made for the island, although they vary due to the considered surface for infiltration. CONAGUA estimated 208,070,000 m³ of recharge in 2015 and 2020 considering the whole island as an infiltration surface (CONAGUA, 2015; DOF, 2020), while other researchers estimated a volume of 47,500,000 m³ for the catchment and southwest areas (Koch *et al.*, 2016). In another study, a volume of approximately 140 × 10⁶ m³/year was estimated by a 0.2 infiltration coefficient from total yearly rainfall (Lesser *et al.*, 1978), while other authors established that annual recharge is only 6% of yearly precipitation volume (Wurli *et al.*, 2003). Although all these reports are important, it represents a challenge to compare the information between the different studies, since in these cases, there is not a full description of the considered precipitation period, the criteria considered for calculating the recharge and the surface area of infiltration. For this study, only the surface area of UGA C1 was considered, and a monthly mean estimated recharge volume of 1,482,705 m³ was calculated from 1990–2019 (Tab. 1) with a downward trend ($Z = -2.938$), as seen in Table 2.

Results from Figure 3 suggest a synchronism between intense precipitation events and high estimated recharge as most of the estimated recharge volumes happen in October and November, concurring with the highest precipitation months (September to November). As in Cozumel high-volume precipitation events begin on September, soils become saturated with water that exceeds evapotranspiration volumes. The geohydrological characteristics of Cozumel favor an absence of runoff, enhancing the aquifer estimated recharge in the following months which decreases as the rainy season ends. When homologating estimate recharge calculations for other islands with similar geohydrological settings, local conditions, regional indicator values and soil moisture capacity adjustments must be considered.

According to Figure 6, there seems to be a reduction in the number of months when recharge occurs. Out of a total of 120 months per decade, the sum of months in which recharge has occurred shows a decrease: 32 for the 1990s, 10 for the 2000s, and 9 from 2011 to 2019. The decrease in estimated recharge could be linked partly to a decreasing trend in precipitation and an increase in evapotranspiration from the past 8–10 years, when a greater volume of evaporation and water uptake by plants reduces available water for aquifer recharge. For the Yucatan Peninsula, data analysis has shown possible multi-annual cyclical patterns of ~10 years for atmospheric parameters (Castro-Borges and Mendoza-Rangel, 2010). Further research on larger time scales and different time periods (example: 10 years) should be performed to identify patterns or cycles among precipitation, temperature, other indicators and their effect on evapotranspiration and recharge for Cozumel.

An increasing trend of water extraction volumes from wells in UGA C1 was observed in Figure 7, along with an important reduction in the quality of wells from 2013–2018 (Fig. 9a and b). Together with an increase in evapotranspiration, these results might indicate a depletion in the freshwater lens of Cozumel. A reduction of the hydraulic head in aquifers can be linked to the overexploitation of groundwater and elevated evapotranspiration/precipitation ratios, resulting in

saltwater intrusions (Villasuso *et al.*, 2011). Therefore, management of the aquifer in Cozumel should consider updated safe extraction yields that are frequently estimated and readjusted to prevent unsustainable water withdrawals from wells, due to the observed variation in hydrometeorological indicators that have an effect over infiltration and aquifer available volumes (Cashman, 2014; Ng *et al.*, 1992).

Cozumel's economy is founded on tourism, water consumption patterns are expected to be influenced by visitors during the called "high and low" touristic seasons. This was observed on the seasonality results for commercial and hotel water use (Fig. 3f and i respectively), as a mean increase of consumption in high season (summer and winter) and a decrease in low season (September and October) (Segrado *et al.*, 2017). On the other hand, due to the lack of industrial development, no visible seasonality was identified in the use of water for this.

An overall increase in tourism activities might also explain the increasing trend in water consumption by the commercial sector and the decreasing trend by the industry sector. A similar trend has been reported in the State of Quintana Roo, where an increase in consumption in the service sector was caused by tourism economic growth (Rodríguez-Huerta *et al.*, 2019b). The domestic sector does not show an increasing trend over time according to the MKI as would be expected for an increasing population on the island.

Although reductions in distribution service hours have been reported by the population (unpublished data), the absence of a trend on domestic use might also be attributed to the practice of digging domestic wells for water necessities in urban areas or where public water distribution services are not available (Koch *et al.*, 2016). By doing so, inhabitants obtain access to the freshwater lens to partially or completely fulfil their water necessities (except for drinking), thus substituting CAPA water distribution services. It should be noted that in Mexico is mandatory to obtain an approved concession title for water exploitation from the Public Registry of Water Rights (REPD) and CONAGUA prior to the creation of new wells. Only users subscribed to REPD may legally extract water within Mexican territory, and although there is a record of the maximum allowed extraction volume per user, there is no information on the actual extracted volume. Additionally, the use of water directly from wells is not recommended due to poor water quality implications unless it has gone through a proper purification process prior to its use.

In Cozumel, there is a popular belief that tourism is an important contributor to freshwater consumption, although this has not been supported by the evidence analyzed here. The results from Figure 8 and Table 2 show that the domestic monthly averaged consumption volume from water distributed by CAPA is 5.8 times greater than the mean monthly hotel sector consumed volume and 4.8 times greater than the mean monthly commercial consumption volume. This evidence positions the domestic sector as the greatest consumer by volume of water extracted from UGA C1, with a mean monthly volume of 177,105 m³. It has been stated that tourists use considerably more water than locals (up to a factor of 10 times), and this effect seems to be exacerbated in developing countries (Becken, 2014). Although no evidence of this effect was found in this study, more research that considers the particularities of the economic activity and environmental

resources of Cozumel is encouraged. On other islands like Barbados and Trinidad and Tobago, water demand by domestic sector can account for up to 31 and 40% of the total demand by sector (Ekwue, 2010). Further studies must consider not only the water volumes distributed by CAPA but also water volumes extracted directly from the aquifer by users with REPDA concessions registered for the island, such as hotels that do not receive water services from CAPA. The smallest consumer of water on the island is the industrial sector, with a mean monthly volume of 167.67 m³.

5 Conclusions

On the island, a static behavior of hydrometeorological and hydrological indicators can be misinterpreted, as reports (if present) for these indicators are often times not updated, non-consecutive, and not monthly based. The results from this study show significant trends in hydrometeorological indicators, estimated recharge, water extraction and most of the volumes distributed to sectors on the island by CAPA. This is evidence to corroborate the hypothesis of a dynamic behaviour of these indicators when analyzed on a continuous monthly basis, thus encouraging their constant future monitoring.

Overall, the results show an increasing trend for mean monthly temperature, evapotranspiration, water extracted from wells, and water consumption by general services and commercial sectors, along with a decreasing trend for precipitation, estimated recharge and water consumed by industry. The MKT did not estimate a significant trend for the domestic and hotel sectors. Estimated recharge volumes showed an important volume increase from extreme precipitation events such as hurricanes and tropical storms. The greatest water consumer by volume was the domestic sector, while industry was the sector that consumed the least. An increase in dejected (77%) and reposed (38%) wells within the catchment area was observed. Hydrometeorological trend evidence, extraction volumes, consumption by the commercial sector, and the deterioration of the state of the wells suggest increasing pressure on the aquifer in UGA C1 from Cozumel in the past 30 years. Monthly analysis of hydrometeorological and hydrological indicators is highly recommended as part of a monitoring framework for island water management strategies development and update, and could be implemented on Caribbean islands with a similar geohydrological setting, where water resources are highly vulnerable and a major sustainability concern. Analysis performed in this study could be suited for karstic islands where hydrometeorological information is not fully available, in order to improve sustainable aquifer management strategies. Due to the uncertainties of the particular effects on islands from climate change on precipitation and temperature, there is a need to understand the dynamic of indicators related to island aquifer recharge and the demand from users as a basis for an adequate water management. For an adequate water management on islands, information from different sources related to the aquifer should be examined and analyzed to enhance an integrative approach. As available freshwater volumes decrease and quality deteriorates, indicator analysis updates become an important tool for making adequate management decisions that contribute to resource sustainability.

Acknowledgments. The authors thank to Universidad de Quintana Roo and Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C. (IPICYT). We thank to CAPA for the accessibility and cooperation, specially to Vlady Vivas Vivas and Gerardo Téllez Díaz. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) for scholarship No. 483462 to G. H-F.

Supplementary Material

The Supplementary Material is available at <https://doi.org/10.1051/limn/2021013>.

References

- Ahmad I, Tang D, Wang T, Wang M, Wagan B. 2015. Precipitation trends over time using Mann-Kendall and spearman's Rho tests in swat river basin, Pakistan. *Adv Meteorol* 15.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 1998. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56 – Crop Evapotranspiration. FAO, Rome, p. 300.
- Alley WM. 1984. On the treatment of evapotranspiration, soil moisture accounting, and aquifer recharge in monthly water balance models. *Water Resour Res* 20: 1137–1149.
- Ayuntamiento Presidencia Municipal Cozumel. 2015. Programa parcial de desarrollo urbano de la zona 1 de Cozumel, Quintana Roo. In Diario Oficial del Estado de Quintana Roo, Gobierno de Quintana Roo, Chetumal, p. 135.
- Bautista F, Bautista D, Delgado-Carranza C. 2009. Calibration of the equations of Hargreaves and Thornthwaite to estimate the potential evapotranspiration in semi-arid and subhumid tropical climates for regional applications. *Atmosfera* 22: 331–348.
- Bautista F, Palacio-Aponte G, Quintana P, Zúñig JA. 2011. Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from the Peninsula of Yucatan, Mexico. *Geomorphology* 135: 308–321.
- Becken S. 2014. Water equity – contrasting tourism water use with that of the local community. *Water Resour Ind* 7–8: 9–22.
- Cashman A. 2014. Water security and services in the Caribbean. *Water* 6: 1187–1203.
- Castro-Borges, Mendoza-Rangel JM. 2010. Influence of climate change on concrete durability in Yucatan Peninsula. *Corros Eng Sci Technol* 45: 61–69.
- CEMDA, (Centro Mexicano de Derecho Ambiental A.C.). 2006. El agua en México: lo que todas y todos debemos saber, Centro Mexicano de Derecho Ambiental, Ciudad de México, p. 93.
- Chen W, Chen C, Li L, Xing L, Huang G, Wu C. 2015. Spatiotemporal analysis of extreme hourly precipitation patterns in Hainan Island, South China. *Water* 7: 2239–2253.
- CONAGUA, (Comisión Nacional del Agua). 2015. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Isla de Cozumel (2305), Diario Oficial de la Federación, Ciudad de México, p. 22.
- Day M. 2010. Challenges to sustainability in the Caribbean karst. *Geol Croat* 63: 149–154.
- De la Barrera B, Metcalfe SE, Boyd DS. 2020. Precipitation regionalization, anomalies and drought occurrence in the Yucatan Peninsula, Mexico. *Int J Climatol* 40: 4541–4555.
- Delgado CC, Bautista F, Orellana LR, Reyes HH. 2011. Classification and agroclimatic zoning using the relationship between precipitation and evapotranspiration in the state of Yucatán, Mexico. *Investig Geogr* 75: 51–60.

- Deng Y, Young C, Fu X, Song J, Peng ZR. 2017. The integrated impacts of human activities and rising sea level on the saltwater intrusion in the east coast of the Yucatan Peninsula, Mexico. *Nat Hazards* 85: 1063–1088.
- Dinpashoh Y, Jhajharia D, Fakheri-Fard A, Singh VP, Kahya E. 2011. Trends in reference crop evapotranspiration over Iran. *J Hydrol* 399: 422–433.
- Doerr A, Hoy D. 1957. Karst landscapes of Cuba, Puerto Rico, and Jamaica. *Sci Mon* 85: 178–187.
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). 2020. ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican, Diario Oficial de la Federación, Ciudad de México.
- Ducci D, Sellerino M. 2013. Vulnerability mapping of groundwater contamination based on 3D lithostratigraphical models of porous aquifers. *Sci Total Environ* 447: 315–322.
- Elkwic EI. 2010. Management of water demand in the Caribbean region: current practices and future needs. *West Indian J Eng* 32: 28–35.
- Emeribe C, Butu A, Laka S. 2019. Trend analysis, cycles and periodicities in annual maximum daily rainfall distributions over Southern Nigeria. *J Niger Assoc Math Phys* 52: 299–312.
- Ercan B, Yilce MI. 2017. Trend analysis of hydro-meteorological variables of Kizilirmak Basin. *Nevsehir Bilim ve Teknoloji Derg* 6: 333–340.
- Escalante P. 1996. Tipos de vegetación de la Isla de Cozumel, Quintana Roo, scale 1:5. In: Proyecto B010 Avifauna de la Isla de Cozumel, Universidad Autónoma de México, Instituto de Biología and Departamento de Zoología, Ciudad de México.
- Escolero O, Marín L, Steinich B, Pacheco J, Anzaldo J. 2005. Geochemistry of the hydrogeological reserve of Mérida, Yucatán, Mexico. *Geofis Int* 44: 301–314.
- Falkland A. 1993. Hydrology and water management on small tropical islands. *Hydrol warm humid Reg* 126: 263–303.
- Flores-Delgado L, Fedick S, Solleiro-Rebolledo E, Palacios-Mayorga S, Ortega-Larrocea P, Sedov S, Osuna-Ceja E. 2011. A sustainable system of a traditional precision agriculture in a Maya homegardens: soil quality aspects. *Soil Tillage Res* 113: 112–120.
- Frausto-Martínez O, Gutiérrez-Aguirre MA, Cervantes-Martínez A, Mejía-Ortiz LM, Yañez G, Koch HC, Vázquez AB, Hernández-Flores G, Colín O, Salazar AS, Giese S. 2018. Estudio hidrológico de la isla de Cozumel, Universidad de Quintana Roo, Cozumel, p. 105.
- Frausto-Martínez O, Zapi-Salazar N, Colín-Olivares O. 2019. Identification of Karst Forms Using LiDAR Technology: Cozumel Island, Mexico. In Abdalla R. (Ed.), Trends in Geomatics, An Earth Science Perspective, Intechopen.
- Gamble D. 2004. Water resource development on small carbonate islands: solutions offered by the hydrologic landscape concept. In: Janelle D, Warf B, Hansen K, Sprague B, Zavala G, (Eds.), WorldMinds: Geographical Perspectives on 100 Problems. Norwell: Kluwer Academic Publishers, pp. 503–507.
- García-Gómez AG, Castaño-Meneses G, Vázquez-González MM, Palacios-Vargas JG. 2014. Mesofaunal arthropod diversity in shrub mangrove litter of Cozumel Island, Quintana Roo, México. *Appl Soil Ecol* 83: 44–50.
- Gocic M, Trajkovic S. 2013. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. *Glob Planet Change* 100: 172–182.
- Gompper ME, Petrites AE, Lyman RL. 2006. Cozumel Island fox (*Urocyon sp.*) dwarfism and possible divergence history based on subfossil bones. *J Zool* 270: 72–77.
- González PD, Martín MJ, Guaita MJ, Sáez-Fernández J. 2020. An analysis of the cost of water supply linked to the tourism industry. An application to the case of the Island of Ibiza in Spain. *Water* 12.
- Gutiérrez-Aguirre MA, Cervantes-Martínez A, Coronado-Álvarez L. 2008. Limnology of groundwater exposures with urban influence in Cozumel island, Mexico. *Verh Internat Verein Limnol* 30: 493–496.
- GWP, (Global Water Partnership). 2014. Technical Focus Paper – Integrated water resources management in the Caribbean: The challenges facing Small Island Developing States, Global Water Partnership, Sweden, p. 52.
- Hall T, Sealy AM, Stephenson TS, Kusunoki S, Taylor MA, Chen AA, Kitoh A. 2013. Future climate of the Caribbean from a super-high-resolution atmospheric general circulation model. *Theor Appl Climatol* 113: 271–287.
- Helsel DR, Hirsch RM. 2002. Statistical methods in water resources. US Geological Service, Reston, p. 510.
- Hernández-Flores G, Gutiérrez-Aguirre MA, Cervantes-Martínez A. 2020. Hacia un manejo integral del recurso hídrico en isla Cozumel, Quintana Roo. *Inspluvium* 10: 34–40.
- Hernández-Torres L, Rebolledo-Vieyra M, Merino-Ibarra M, Soto M, Le-Cossec A, Monroy-Ríos E. 2011. Groundwater pollution in a karstic region (NE Yucatan): Baseline nutrient content and flux to coastal ecosystems. *Water Air Soil Pollut* 218: 517–528.
- Herrera-Silveira JA, Medina-Gómez I, Aranda-Cicerol N, Zaldivar A, Ramirez J, Trejo J. 2002. Trophic status in coastal waters of the Yucatan Peninsula (SE, Mexico) using water quality indicators. *Coast Environ Environ* 8: 351–359.
- Holden J, Grayson RP, Berdeni D, Bird S, Chapman PF, Edmondson JL, Firbank LG, Helgason T, Hodson ME, Hunt SFP, Jones DT, Lippage MG, Marshall-Harries E, Nelson M, Prendergast-Miller M, Shaw H, Wade RN, Leake JR. 2019. The role of hedgerows in soil functioning within agricultural landscapes. *Agric Ecosyst Environ* 273: 1–12.
- Hussain F, Nabi G, Waseem M. 2015. Rainfall trend analysis by using the Mann-Kendall test & Sen's slope estimator: a case study of District Chakwal Rain Gauge, Barani Area, Northern Punjab Province, Pakistan. *Sci Int* 27: 3159–3165.
- INEGI, (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2013. Conjunto de datos vectoriales edafológicos, escala 1:250 000 F16-11, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Aguascalientes.
- Jaiswal R, Lohani A, Tiwari H. 2015. Statistical analysis for change detection and trend assessment in climatological parameters. *Environ Process* 2: 729–749.
- Jaleel MI, Ibrahim SA, Hussain A, Mustafa M, Pathirana A. 2020. A screening approach for assessing groundwater quality for consumption in small islands: case study of 45 inhabited islands in the Maldives. *Water* 12: 2209.
- Kaçaroğlu F. 1999. Review of groundwater pollution and protection in karst areas. *Water Air Soil Pollut* 113: 337–356.
- Kammoun S, Trabelsi R, Re V, Zouari K. 2021. Coastal aquifer salinization in semi-arid regions: the case of Grombalia (Tunisia). *Water* 13.
- Koch K, Frausto O, Giese S, Schirmer M, Steenbeck T. 2016. Impact on groundwater of a karstic aquifer in the informal settlement 'Las Finca' on Cozumel Island, Mexico. *WIT Trans Ecol Environ* 203: 147–158.
- Len L, Parise M. 2009. Managing environmental problems in Cuban karstic aquifers. *Environ Geol* 58: 275–283.

- Lesser JH, Azpeita RJ, Lesser JM. 1978. Geohidrología de la isla de Cozumel, Q. Roo. *Recor Hidráulicos* 7: 32-49.
- Medici G, Baják P, West L, Chapman P, Bauwart S. 2020. DOC and nitrate fluxes from farmland; impact on a dolostone aquifer KCZ. *J Hydrol* 125658.
- Medici G, Engdahl NB, Langman JB. 2021. A basin-scale groundwater flow model of the Columbia plateau regional aquifer system in the Palouse (USA): insights for aquifer vulnerability assessment. *Int J Environ Res* 15: 299-312.
- Medici G, West L, Bauwart S. 2019. Groundwater flow velocities in a fractured carbonate aquifer-type: implications for contaminant transport. *J Contam Hydrol* 222: 1-16.
- Mendoza-Vizcaino J, Sumper A, Sudria-Andreu A, Ramirez JM. 2016. Renewable technologies for generation systems in islands and their application to Cozumel Island, Mexico. *Renew Sustain Energy Rev* 64: 348-361.
- Modaresi RA, Khalili D, Kamgar-Haghighi AA, Zand-Parsa S, Banimahd SA. 2016. Assessment of seasonal characteristics of streamflow droughts under semiarid conditions. *Nat Hazards* 82: 1541-1564.
- Neeti N, Rogan J, Christman Z, Eastman JR, Millones M, Schneider L, Nickl E, Schmook B, Turner BL, Ghimire B. 2012. Mapping seasonal trends in vegetation using AVHRR-NDVI time series in the Yucatán Peninsula, Mexico. *Remote Sens Lett* 3: 433-442.
- Ng K-C, Jones B, Beswick R. 1992. Hydrogeology of Grand Cayman, British West Indies: a karstic dolostone aquifer. *J Hydrol* 134: 273-295.
- Nwogu EC, Iwueze IS, Nlebedim VU. 2016. Some tests for seasonality in time series data. *J Mod Appl Stat Methods* 15: 382-399.
- Orellana R, Nava F, Espadas C. 2007. El clima de Cozumel y la Riviera Maya. In: Mejía-Ortiz LM. (Ed.) Biodiversidad acuática de la Isla de Cozumel, Universidad de Quintana Roo - Plaza y Valdéz, México, 23-32.
- Phuong DND, Linh VT, Nhat TT, Dung HM, Loi NK. 2019. Spatiotemporal variability of annual and seasonal rainfall time series in Ho Chi Minh city, Vietnam. *J Water Clim Chang* 10: 658-670.
- Pulido-Velazquez D, Collados-Lara AJ, Alcalá FJ. 2018. Assessing impacts of future potential climate change scenarios on aquifer recharge in continental Spain. *J Hydrol* 567: 803-819.
- Raei E, Shafiee ME, Nikoo MR, Berglund E. 2019. Placing an ensemble of pressure sensors for leak detection in water distribution networks under measurement uncertainty. *J Hydroinformatics* 21: 223-239.
- Reguero B, Méndez F, Losada I. 2013. Variability of multivariate wave climate in Latin America and the Caribbean. *Glob Planet Change* 100: 70-84.
- Richards HG. 1937. Land and freshwater Mollusks from the island of Cozumel, Mexico, and their bearing on the geological history of the region. *Proc Am Philos Soc* 77: 249-262.
- Rodríguez-Huerta E, Rosas-Casals M, Hernández-Terrones LM. 2019a. Water societal metabolism in the Yucatan Peninsula. The impact of climate change on the recharge of groundwater by 2030. *J Clean Prod* 235: 272-287.
- Rodríguez-Huerta E, Rosas-Casals M, Hernández-Terrones LM. 2019b. A water balance model to estimate climate change impact on groundwater recharge in Yucatan Peninsula, Mexico. *Hydrol Sci J* 65: 470-486.
- Rosman T, Domínguez E, Chavarró J. 2016. Comparing trends in hydrometeorological average and extreme data sets around the world at different time scales. *J Hydrol Reg Stud* 5: 200-212.
- Saadat S, Khalili D, Kamgar-Haghighi AA, Zand-Parsa S. 2013. Investigation of spatio-temporal patterns of seasonal streamflow droughts in a semi-arid region. *Nat Hazards* 69: 1697-1720.
- Sánchez y Pinto I, Cervantes-Martínez A, González IIR, Vázquez CM, Gutiérrez-Aguirre M. 2015. Evidencia de flujo preferencial al mar, del cenote Caletita, en Cozumel, México. *Ingeniería* 19: 1-12.
- SECTUR. (Secretaría de Turismo). 2018. Programa Marco para fomentar acciones para restablecer el balance del ciclo del agua en Cozumel, Secretaría de Turismo, Ciudad de México, p. 85.
- SEDETUS. (Secretaría de Desarrollo Territorial Urbano Sustentable). 2019. Programa Estatal de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano Sustentable de Quintana Roo, Quintana Roo, p. 465.
- Segrado PR, Arroyo AI, Amador SK, Farmer F. 2017. Motivational factors for tourists who choose Cozumel, Mexico, as a holiday destination in low seasons. *El Periplo Sustentable* 32.
- Shewhart WA, Wilks S. 2016. Time series analysis: forecasting and control. Hoboken: John Wiley & Sons, p. 669.
- Spaw RH. 1978. Late Pleistocene Carbonate Bank Deposition: Cozumel Island, Quintana Roo, Mexico. *Gulf Coast Assoc Geol Soc Trans* 28: 601-619.
- Taylor MA, Stephenson TS, Chen AA, Stephenson KA. 2012. Climate change and the Caribbean: review and response. *Caribb Stud* 40: 169-200.
- Téllez O, Cabrera E, Linares E, Bye R. 1989. Las plantas de Cozumel, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, p. 75.
- Tercera Legislatura Constitucional del Estado de Quintana Roo. (Last reform on June 15, 2017). Decreto Ley 14, Ley de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Quintana Roo. Published in Diario Oficial del Estado de Quintana Roo, on Wednesday, October 6, 1981.
- Thornthwaite CW. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr Rev* 38: 55-94.
- Toews MW, Whitfield PH, Allen DM. 2007. Seasonal statistics: the 'seas' package for R. *Comput Geosci* 33: 944-951.
- Vázquez-Domínguez E, Suárez-Atilano M, Booth W, González-Baca C, Cuarón AD. 2012. Genetic evidence of a recent successful colonization of introduced species on islands: *Boa constrictor imperator* on Cozumel Island. *Biol Invasions* 14: 2101-2116.
- Villasuso PMJ, Sánchez y Pinto IA, Cimul MC, Casares SR, Baldazo EG, Souza CJ, Poot EP, Peck AC. 2011. Hydrogeology and conceptual model of the karstic coastal aquifer in northern Yucatan state, Mexico. *Trop Subtrop Agroecosystems* 13: 243-260.
- Vosper EL, Mitchell DM, Emanuel K. 2020. Extreme hurricane rainfall affecting the Caribbean mitigated by the Paris agreement goals. *Environ Res Lett* 15: 104053.
- Ward WC. 1997. Geology of coastal islands, northeastern Yucatan Peninsula. In: Vacher H. and Quim T. (Eds.), Geology and

- Hydrogeology of Carbonate Islands. Amsterdam: Elsevier Science, 275–298.
- Wurl J, Giese S, Frausto O, Chale G. 2003. Ground Water Quality Research on Cozumel Island, State of Quintana Roo, Mexico. *In*: Second International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers— Monitoring, Modeling, and Management, Merida, México, March 30 – April 2, 171–176.
- Yadav R, Tripathi SK, Pramithi G, Dubey SK. 2014. Trend analysis by Mann-Kendall test for precipitation and temperature for thirteen districts of Uttarakhand. *J. Agrometeorol* 16: 164–171.
- Zepeda QDS, Loeza RCM, Munguía VNE, Peralta JE, Velázquez CLE. 2018. Sustainability strategies for coastal aquifers: A case study of the Hermosillo Coast aquifer. *J Clean Prod* 195: 1170–1182.

Cite this article as: Hernández-Flores G, Gutiérrez-Aguirre MA, Cervantes-Martínez A, Marín-Celestino AE. 2021. Historical analysis of a karst aquifer: recharge, water extraction, and consumption dynamics on a tourist island (Cozumel, Mexico). *Ann. Limnol. - Int. J. Lim.* 57: 16