



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Posgrado en Maestría en Ciencias del Agua

Índice de calidad del agua de cuerpos de agua dulce kársticos
de Cancún y Playa del Carmen

Tesis que presenta

Eunices Arely Hernández De la O

En opción al título de

Maestro en Ciencias del Agua

Cancún, Quintana Roo, México

2023

DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

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

Firma: EUNICES HERVANO EZD.

Nombre: Eunices Arely Hernández De la O

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA DE YUCATÁN, A. C.

POSGRADO EN CIENCIAS DEL AGUA



RECONOCIMIENTO

Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis de Eunices Arely Hernández De la O titulado “**Índice de Calidad del Agua de cuerpos de agua dulce kársticos urbanos de Cancún y Playa del Carmen**”, fue realizado en la Unidad de Ciencias del Agua, en la línea de investigación de Sostenibilidad de los ecosistemas acuáticos, en el Laboratorio de Ecología Costera, Laboratorio de Físicoquímicos, Laboratorio de Bacteriología y Laboratorio de Cromatografía de Orgánicos del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. bajo la dirección del Dr. Antonio Almazán Becerril y la Dra. Rosa María Leal Bautista, perteneciente al Programa de Posgrado en Ciencias del Agua de este Centro.

Atentamente



Dra. Cecilia Hernández Zepeda

Director(a) de Docencia

Mérida, Yucatán, México, a 31 de mayo de 2023

AGRADECIMIENTOS

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por brindarme la beca nacional de posgrado de manutención, lo cual me permitió poder dedicarme por completo a la elaboración este proyecto de investigación (Número de becario 1055225). Igualmente, gracias al CONACYT por la beca otorgada del Programa de Incorporación de Mujeres Indígenas al Posgrado para el Fortalecimiento Regional, en dónde me capacitaron para los exámenes de ingreso al posgrado y financiaron.

Agradecimiento al conjunto de laboratorio en donde se realizaron los análisis de las muestras, al Laboratorio de Ecología Costera, Laboratorio de Fisicoquímicos, Laboratorio de Bacteriología y Laboratorio de Cromatografía del Centro de Investigación Científica de Yucatán. Igualmente, gracias al Laboratorio del Centro Universitario de Investigación Oceanológicas de Manzanillo y al Laboratorio de Fotocatálisis y Electroquímica Ambiental de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Gracias a los directores de tesis, al Dr. Antonio Almazán Becerril y a la Dra. Rosa María Leal Bautista, quienes me guiaron en el diseño y ejecución del proyecto de investigación. Agradecimientos al Dr. Aramis Olivos Ortiz y a la Dra. Ma. Araceli Hernández Ramírez, quienes me recibieron en sus laboratorios para los análisis de nitrógeno total, fósforo total, toxicidad aguda y carbono orgánico total, además, participaron como comité tutorial y brindaron opiniones, conocimiento y revisión al proyecto de investigación. Gracias al Dr. Raúl Tapia Tusell por ser revisor de la tesis.

Agradecimiento al Mtro. Benjamín Delgado Pech, técnico asociado C, quién participó en las visitas perspectiva de los cenotes de Cancún y Playa del Carmen, en los muestreos, estandarización y procesamiento del análisis de huevos de helmintos, sólidos sedimentables y sólidos suspendidos. Agradecimiento al Mtro. José Epigmenio Bautista García, técnico asociado C, quién participó en la capacitación y procesamiento del análisis de coliformes, enterococos, demanda biológica de oxígeno, grasas y aceites. Agradecimiento a la Lic. Daniela Ortega Camacho, técnico asociado C, quién participó en la capacitación para el análisis de la demanda química de oxígeno. Agradecimientos al Mtro. Jorge Carlos Peniche Pérez, técnico asociado B, quien participó en la capacitación para el análisis de oxígeno disuelto. Agradecimientos al Dr. Diego Pino, asistente de investigador, quién participó en la

capacitación y procesamiento para el análisis de toxicidad aguda y carbono orgánico total. Agradecimientos al Lic. Eric García, asistente de investigador, quién participó en la capacitación y procesamiento para el análisis de nitrógeno y fósforo total.

Gracias a la Secretaría de Ecología y Desarrollo Urbano de Cancún y Playa del Carmen, a la Biól. Martha Abundes y a la Biól. Lucelly Ramos por permitirnos el acceso a los cenotes de estudio. Gracias a la Mtra. Damaris Irola Sansores y al Biol. David Espinosa Puch por sus asesorías en la ubicación de los cenotes urbanos.

Gracias a los estudiantes de SAE del CICY, a Andrea Galindo Campos, María Chan Hay, Luis Antonio Balam García y Cynthia Carolina Quechuleño García, quienes participaron en la asistencia en los laboratorios. Principalmente gracias a Andrea, quién fue un gran apoyo para la estandarización de los protocolos para los análisis del agua. Agradecimientos a mis compañeros de maestría, al Biól. Juan Manuel Arana Ravel y a la Ing. Dayanna Frías Hernández, quienes se convirtieron en mis mejores amigos y participaron en el muestreo, asistencia en el laboratorio y opiniones de discusión. Igualmente agradezco a la Biól. Gaby Pineda, a la Ing. Jimena Peraza Alvarado y a la Ing. Adriana Hernández Pérez por su amistad y palabras de aliento.

Gracias a mi familia, a mi padre Antonio Hernández, a mi madre Ana de la O, a mis hermanos Jahdiel Hernández y Jafet Hernández y a mi esposo Miguel Ángel Chan por el apoyo y amor incondicional.

DEDICATORIA

A todas las niñas de escasos recursos que han tenido el sueño de ser mujeres de ciencia.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	IV
ÍNDICE DE TABLAS	VI
GLOSARIO DE ACRÓNIMOS	VII
RESUMEN.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
INTRODUCCIÓN	1
Capítulo 1.....	2
1.1 ANTECEDENTES.....	2
1.1.1 La vulnerabilidad del sistema cárstico de la península de Yucatán	2
1.1.2 Ciudades del norte de Quintana Roo: Cancún y Playa del Carmen	4
1.1.3 Los cuerpos de agua kársticos urbanos	5
1.1.4 Normativa para la descarga de aguas residuales	7
1.1.5 Indicadores de calidad del agua en México.....	9
1.1.6 Estudios de la calidad del agua en cuerpos kársticos en la ciudad de Cancún	10
1.1.7 Estudios de la calidad del agua en cuerpos kársticos en la ciudad de Playa del Carmen.....	12
1.1.8 Índices de calidad del agua aplicados para agua subterránea.....	13
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	15
1.1 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	15
1.2 OBJETIVOS	16
1.3 HIPÓTESIS	16
Capítulo 2.....	17
2.1 METODOLOGÍA	17
2.1.1 Descripción del área de estudio.....	17
2.1.2 Estrategia de muestreo	18
2.1.3 Colecta de muestras.....	21
2.1.4 Análisis de laboratorio de parámetros de calidad del agua	23
2.1.4.1 Oxígeno disuelto	24
2.1.4.2 Materia flotante	24
2.1.4.3 Coliformes totales e indicadores fecales	24
2.1.4.4 Demanda bioquímica de oxígeno de 5 días (DBO ₅).....	25
2.1.4.5 Demanda química de oxígeno (DQO).....	25
2.1.4.6 Carbono orgánico total.....	26

2.1.4.7 Color verdadero.....	26
2.1.4.8 Sólidos sedimentables	27
2.1.4.6 Sólidos suspendidos	27
2.1.4.7 Grasas y aceites	28
2.1.4.8 Huevos de helminto.....	28
2.1.4.9 Nitrógeno y fósforo total	30
2.1.4.10 Toxicidad aguda	30
2.1.5 Análisis estadísticos de datos	30
2.1.5.1 Análisis univariados	30
2.1.5.2 Análisis multivariados.....	30
2.1.6 Índice de calidad del agua	31
Capítulo 3.....	36
3.1 RESULTADOS: VARIABILIDAD DE PARÁMETROS Y CALIDAD DE ACUERDO CON LA NORMATIVA MEXICANA	36
3.1.1 pH.....	36
3.1.2 Temperatura	37
3.1.3 Conductividad eléctrica0.....	38
3.1.4 Sólidos disueltos totales	38
3.1.5 Oxígeno disuelto	39
3.1.6 Materia flotante	40
3.1.7 Coliformes totales	40
3.1.9 <i>E. coli</i> y <i>Enterococcus</i>	41
3.1.10 Demanda Biológica de Oxígeno al 5to día (DBO ₅)	42
3.1.11 Demanda Química de Oxígeno	43
3.1.12 Carbono orgánico total	44
3.1.13 Color verdadero.....	45
3.1.14 Sólidos suspendidos	46
3.1.15 Sólidos sedimentables	47
3.1.16 Grasas y aceites	48
3.1.17 Huevos de helmintos	49
3.1.18 Nitrógeno total	50
3.1.19 Fósforo total	51
3.1.20 Toxicidad aguda	52
3.2 Resultados multivariados de calidad del agua.....	53
3.2.1 Correlaciones entre variables.	53

1. 3.2. Dendrogramas de agrupamiento.....	54
3.2.3 ANOSIM y SIMPER.....	56
3.3 RESULTADOS ICA.....	57
3.4 DISCUSIÓN	60
3.4.1 Cuantificación de parámetros físicos, químicos y biológicos de calidad del agua en CADKU de Cancún y Playa del Carmen	60
A) Parámetros físicos	60
B) Parámetros químicos	63
C) Parámetros biológicos	68
3.4.2 Desarrollo de un Índice de Calidad del Agua que permite comparar la calidad del agua en cuanto al riesgo a la salud humana y el ecosistema	71
3.4.3 Comparación del índice de calidad del agua en base a las condiciones de la NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-001-SEMARNAT-2021	73
CONCLUSIONES	77
3.4.14 Recomendaciones.....	78
3.4.15 PERSPECTIVAS para el ICA NOM-001-2021.....	79
BIBLIOGRAFÍA.....	80
ANEXO A.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Líneas de flujos del agua subterránea de la península de Yucatán	2
Figura 1.2. Mapa del grado de vulnerabilidad intrínseca de la península de Yucatán	3
Figura 1.3 Volumen de descarga total proveniente de aguas concesionadas.	3
Figura 1.4. Tipos de cenotes: A) caverna, B) Aguada, C) cenote típico.....	5
Figura 2.1 Probabilidad diaria de precipitación en Cancún.	18
Figura 2.2 Probabilidad diaria de precipitación en Playa del Carmen..	18
Figura 2.3 Sitios de muestreo en Cancún, Quintana Roo.....	20
Figura 2.4 Sitios de muestreo en Playa del Carmen, Quintana Roo.	21
Figura 2.5 Jerarquía de los parámetros para la salud humana y del ecosistema.	31
Figura 3.1 Valores de pH de Cancún y Playa del Carmen en temporada de secas y lluvias 2022...	36
Figura 3.2 Valores de temperatura de Cancún y Playa del Carmen en temporada de secas y lluvias 2022.....	37
Figura 3.3 Valores de conductividad eléctrica de Cancún y Playa del Carmen en temporada de secas y lluvias 2022.....	38
Figura 3.4 Concentración de sólidos disueltos totales de Cancún y Playa del Carmen en temporada de secas y lluvias 2022.	39
Figura 3.5 Concentración de oxígeno disuelto de Cancún y Playa del Carmen en temporada de secas y lluvias 2022.....	40
Figura 3.6 Concentración de Coliformes totales de Cancún y Playa del Carmen en temporada de secas (mayo) y lluvias (agosto) 2022	41
Figura 3.7 Concentración de E. coli y Enterococcus de Cancún y Playa del Carmen en las temporadas de secas (barras negras) y lluvias (barras grises) de 2022..	42
Figura 3.8 Concentración de DBO5 de Cancún y Playa del Carmen en temporada de secas y lluvias 2022.....	43
Figura 3.9 Concentración de DQO de Cancún y Playa del Carmen en temporada de secas y lluvias 2022.....	44
Figura 3.10 Concentración de carbono orgánico total (mg/L) de Cancún y Playa del Carmen en temporada de secas y lluvias 2022.	45
Figura 3.11 Valores de color verdadero (coeficiente de absorción espectral) de Cancún y Playa del Carmen en temporada de secas y lluvias 2022.	46
Figura 3.12 Concentración de Sólidos suspendidos totales de Cancún y Playa del Carmen en temporada de secas y lluvias 2022.....	47

Figura 3.13 Concentración de sólidos sedimentables (ml/L) en temporada de secas y lluvias 2022.	48
Figura 3.14 Concentración de Grasas y aceites de Cancún y Playa del Carmen en temporada de secas y lluvias 2022.....	49
Figura 3.15 Concentración de huevos de helmintos/L de los CADKU de Cancún y Playa del Carmen en temporada de secas y lluvias 2022.....	50
Figura 3.16 Concentración de Nitrógeno Total (mg/L) de los CADKU de Cancún y Playa del Carmen en temporada de secas y lluvias 2022.....	51
Figura 3.17 Concentración de Fósforo Total (mg/L) de los CADKU de Cancún y Playa del Carmen en temporada de secas y lluvias 2022	52
Figura 3.18 Porcentaje de la inhibición de la luminiscencia de la bacteria <i>Vibrio fischeri</i> de los CADKU de Cancún y Playa del Carmen en temporada de secas y lluvias 2022.....	53
Figura 3.19 Correlación lineal entre los parámetros analizados.	54
Figura 3.20 Cluster de Bray-Curtis. A) Considerando todos los parámetros. B) Considerando solamente los parámetros incluidos en el ICA (excepto los no continuos).....	55
Figura 3.21 NMDA.	55
Figura 3.22 ICA en temporada de secas y lluvias en Cancún y Playa del Carmen.).	59
Figura 3.23 Correlación entre el ICA 1996 y 2021.....	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Precipitación y temperatura en Quintana Roo en el 2021	4
Tabla 1.2 Límites Máximos Permisibles de los indicadores de calidad del agua de la NOM-001-SEMARNAT-2021 y 1996.....	8
Tabla 1.3. Valores reportados de los parámetros fisicoquímicos en cenotes de Cancún.	10
Tabla 1.4 Riesgos ambientales en cenotes, cavernas y humedales de Cancún.....	11
Tabla 1.5 Valores reportados de coliformes en cenotes de Cancún.	11
Tabla 1.6 Valores reportados de los parámetros fisicoquímicos en pozos de Cancún.	12
Tabla 1.7 Parámetros fisicoquímicos y biológicos de cenotes de Playa del Carmen-Solidaridad. ..	12
Tabla 1.8 Parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos de cenotes y pozos de monitoreo de Playa del Carmen.	13
Tabla 2.1 Coordenadas de los cenotes de donde se obtendrán las muestras.	19
Tabla 2.2 Parámetros y normativa relacionada.	23
Tabla 2.3 Ponderación de los parámetros.....	34
Tabla 3.1 Materia flotante en temporada de secas y lluvias 2022.....	40
Tabla 3.2. SIMPER todas las variables.	56
Tabla 3.3. SIMPER variables ICA	56
Tabla 3.4. Subíndices y valor del ICA	57
Tabla 3.5 Comparación de la NOM-001-SEMARNAT-1996 y 2021.....	74

GLOSARIO DE ACRÓNIMOS

CAE= Coeficiente de absorción espectral

CADKU=Cuerpos de agua dulce kársticos urbanos

CE= Conductividad eléctrica

CF= Coliformes fecales

C= Cancún

CONAGUA= Comisión Nacional del Agua

COT= Carbono orgánico total

CT= Coliformes totales

DQO= Demanda química de oxígeno

DBO₅= Demanda biológica de oxígeno

ICA= Índice de Calidad del Agua

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía

IMTA= Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

HH= Huevos de helmintos

GYA=Grasas y aceites

NMX= Norma mexicana

NOM= Norma oficial mexicana

NT= Nitrógeno total

LMP= Límite máximo permisible

OD= Oxígeno disuelto

PC= Playa del Carmen

PT= Fósforo total

SEMARNAT= Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

SDT= Sólidos disueltos totales

SST= Sólidos suspendidos totales

SS= Sólidos sedimentables

T= Temperatura

RESUMEN

Los cenotes del norte del Quintana Roo presentan vulnerabilidad por su característica geológica kárstica de la zona ante la contaminación por la descarga de aguas residuales tratadas o semitratadas que se infiltran o arriban a estos cenotes con agua subterránea y ponen en riesgo la salud humana y del ecosistema.

La NOM-001-SEMARNAT 1996 y 2021 establece un conjunto de parámetros físicos, químicos y biológicos para determinar la calidad de aguas residuales con base en límites máximos permisibles. Una forma de representar el grado de contaminación existente en el agua es tomando en cuenta diversos parámetros mediante un Índice de Calidad del Agua (ICA). Por lo anterior, en este estudio se realizó la evaluación de la calidad del agua de 10 cuerpos de agua ubicados en las ciudades de Cancún y Playa del Carmen mediante la generación de un ICA con base en la normativa actual la NOM 001-SERMARNAT-2021 y la normativa anterior, la NOM 001-SEMARNAT-1996. La evaluación de los indicadores se llevó a cabo en dos épocas contrastantes (lluvias y secas). En el ICA se consideraron los siguientes parámetros, considerando su peso de acuerdo con el riesgo a la salud humana y del ecosistema: *E. coli* (5), huevos de helmintos (5), toxicidad aguda (5), demanda química de oxígeno (4), color verdadero (4), carbono orgánico total (3), demanda bilógica de oxígeno (3), nitrógeno total, (3) fósforo total (3), grasas y aceites (2), sólidos suspendidos (1), sólidos sedimentables (1), materia flotante (1), pH (0.5) y temperatura (0.5).

Los resultados muestran que los valores de coliformes fecales, huevos de helmintos, carbono orgánico disuelto, toxicidad aguda, nitrógeno total, sólidos suspendidos y color verdadero no cumplieron con los límites máximos permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-2021 y NOM-001-SEMARNAT-1996. La NOM-001-SEMARNAT-2021 mostró ser más eficaz para evaluar la contaminación del agua.

El ICA-001-2021 indicó los sitios con mayor contaminación y que requieren de atención en su manejo son C2, PC5, C5 y C3. El uso continuo del ICA con base en la NOM-001-SEMARNAT-2021, contribuiría a identificar los sitios que presentan un riesgo para la salud humana y del ecosistema, así como evaluar las actividades de gestión del acuífero.

ABSTRACT

The sinkholes of northern Quintana Roo are vulnerable due to their karstic geological characteristics of the area in the face of contamination from the discharge of treated or semi-treated wastewater that infiltrates or reaches these cenotes with groundwater and puts human and ecosystem health at risk.

NOM-001-SEMARNAT 1996 and 2021 establishes a set of physical, chemical, and biological parameters to determine the quality of wastewater based on maximum permissible limits. One way to represent the degree of contamination in the water is by considering various parameters through a Water Quality Index (WQI). Therefore, in this study the evaluation of the water quality of 10 bodies of water located in the cities of Cancun and Playa del Carmen was carried out through the generation of an ICA based on the current regulations NOM 001-SERMARNAT-2021. and the previous regulations, NOM 001-SEMARNAT-1996. The evaluation of the indicators was carried out in two contrasting seasons (rainy and dry). In the ICA, the following parameters were considered, considering their weight according to the risk to human and ecosystem health: *E. coli* (5), helminth eggs (5), acute toxicity (5), chemical oxygen demand (4), true color (4), total organic carbon (3), biological oxygen demand (3), total nitrogen, (3) total phosphorus (3), fats and oils (2), suspended solids (1), solids settleable (1), floating matter (1), pH (0.5) and temperature (0.5).

The results show that the values of fecal coliforms, helminth eggs, dissolved organic carbon, acute toxicity, total nitrogen, suspended solids, and true color did not comply with the maximum permissible limits of NOM-001-SEMARNAT-2021 and NOM-001-SEMARNAT-1996. NOM-001-SEMARNAT-2021 proved to be more effective in assessing water contamination.

The ICA-001-2021 indicated the sites with the highest contamination and that require attention in their management are C2, PC5, C5 and C3. The continuous use of the ICA based on NOM-001-SEMARNAT-2021, would help to identify the sites that present a risk to human and ecosystem health, as well as to evaluate the aquifer management activities.

INTRODUCCIÓN

El concepto del Karst está vinculado a la disolución de rocas (caliza, evaporitas, anhidrita y yeso) por su interacción con el agua, lo cual genera diferentes expresiones o formas geológicas kársticas (Estrada-Medina *et al.*, 2019). Entre estas se encuentran las dolinas, que son depresiones asociadas a los procesos de erosión hídrica (Gutiérrez-Santoalla *et al.*, 2006). Localmente, en la península de Yucatán se denominan cenotes por los términos mayas *ts'ono'ot* o *d'zonot* que significa “caverna con depósito de agua”. Éstos son espacios subterráneos con agua que, en algún grado, se encuentren abiertos a la superficie (Beddows *et al.*, 2007). Las dolinas o cenotes ubicados dentro de núcleos urbanos se identifican en esta investigación como “cuerpos de agua dulce kársticos urbanos” (CADKU), se encuentran dentro de las ciudades debido a la expansión de las áreas habitacionales. Estos no suelen estar sujetos a conservación o algún tipo de protección especial. La importancia de la conservación de los CADKU radica en los beneficios que brindan para la población. Algunos CADKU tienen uso turístico y recreativo o están dentro de áreas verdes (parques y jardines) dedicadas al esparcimiento (Cejudo-Espinosa *et al.*, 2018), actividades que son consideradas como servicios ecosistémicos en la categoría de servicios culturales; asimismo, se evita que estos sean focos de contaminación hacia el acuífero.

La península de Yucatán presenta vulnerabilidad en relación con la infiltración de contaminantes en la roca caliza y la descarga de aguas residuales a aguas subterráneas que pone el riesgo la salud humana y del ecosistema (CONAGUA, 2022a). La NOM-001-SEMARNAT 1996 y 2021 establecen un conjunto de parámetros físicos, químicos y biológicos para determinar la calidad de aguas residuales con base en límites máximos permisibles. Una forma de representar el grado de contaminación existente en el agua, tomando en cuenta diversos parámetros es mediante un índice de calidad del agua (SEMARNAT, 2013). Por lo anterior, este estudio se enfoca en determinar la calidad del agua de los cuerpos de agua dulce kársticos de las ciudades de Cancún y Playa del Carmen, ubicadas en la zona noreste del estado de Quintana Roo, en la temporada de secas y lluvias. Se propone un ICA para la región que ayude a los tomadores de decisiones a tener una herramienta adecuada de monitoreo para controlar la contaminación de los cenotes y el agua subterránea que fluye a través de los centros urbanos de la zona.

CAPÍTULO 1

1.1 ANTECEDENTES

1.1.1 La vulnerabilidad del sistema cárstico de la península de Yucatán

En la península de Yucatán, las manifestaciones kársticas donde el acuífero tiene contacto con la atmósfera constituyen el único acceso al agua subterránea de forma natural (Torres-Talamante *et al.*, 2011), por lo que se pueden considerar como un medio para evaluar las condiciones de calidad del agua subterránea. Debido a las condiciones de porosidad y permeabilidad de la roca caliza, el agua subterránea puede fluir a través de la matriz de la roca o por las fracturas, por lo tanto, toda el área de la península de Yucatán recibe recarga de agua a través de las precipitaciones. Eventualmente, el agua proveniente del continente desemboca en la costa desde las zonas de mayor elevación topográfica hacia las zonas de mayor planicie como se muestra en la Figura 1.1 (Bauer-Gottwein *et al.* 2011).

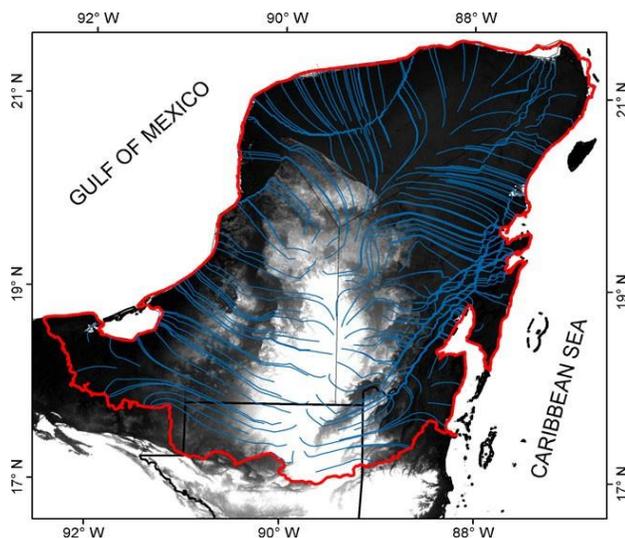


Figura 1.1 Líneas de flujos del agua subterránea de la península de Yucatán (Bauer-Gottwein et al. 2011).

La península de Yucatán presenta vulnerabilidad intrínseca, asociada a las actividades antropogénicas. CONAGUA (2022a) presenta un mapa de vulnerabilidad intrínseca (Figura 1.2) dónde la zona norte de Quintana Roo está categorizada con vulnerabilidad “Muy alto” (asociada a la planicie costera y las fracturas y dolinas) y “Extrema” (asociado al sistema de cavernas de aguas subterráneas). Otra de las causas de vulnerabilidad específica del acuífero son las descargas de aguas residuales, de acuerdo con CONAGUA (2022a) en península de

Yucatán el volumen total de descargas de aguas residuales que retornan al acuífero es de 2, 136.60 Mn³/ año. En el mapa de la Figura 1.3 se identifican las zonas con mayores descargas de acuerdo con el tipo de concesión del agua, las cuales son principalmente centros urbanizados: Cancún, Mérida y Campeche centros urbanizados (CONAGUA, 2022a).

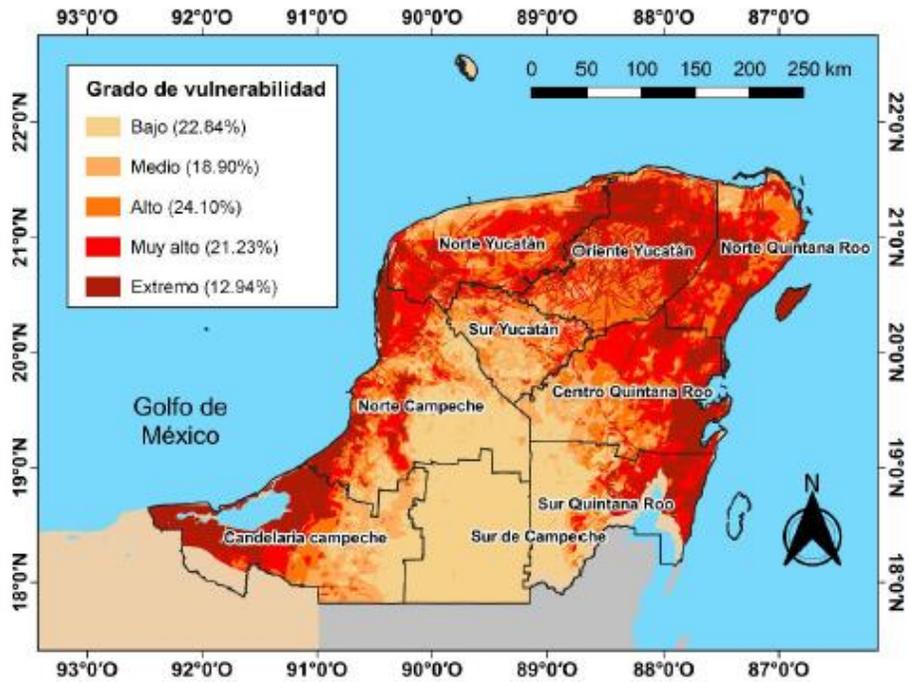


Figura 1.2. Mapa del grado de vulnerabilidad intrínseca de la península de Yucatán (CONAGUA, 2022a)

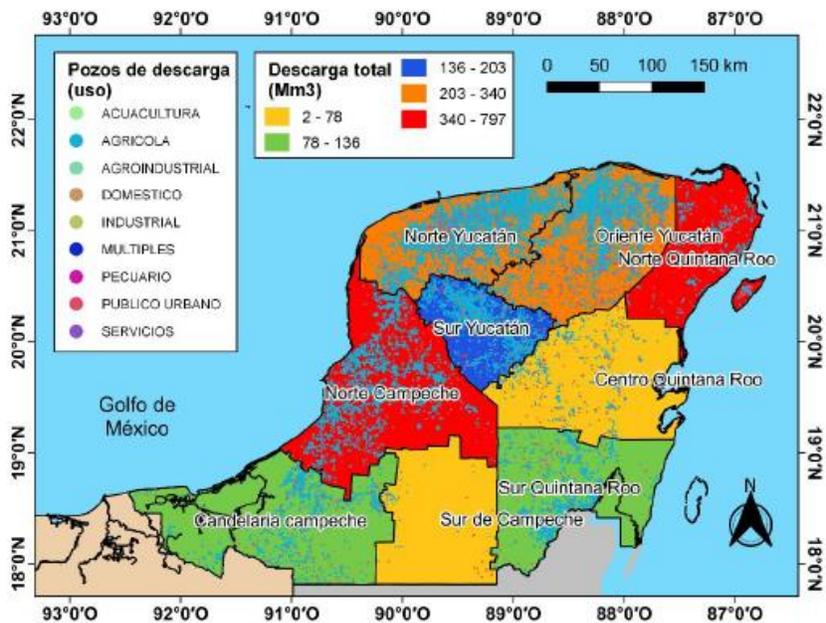


Figura 1.3 Volumen de descarga total proveniente de aguas concesionadas (CONAGUA, 2022a).

1.1.2 Ciudades del norte de Quintana Roo: Cancún y Playa del Carmen

Las ciudades de Cancún y Playa del Carmen, pertenecientes respectivamente a los municipios de Benito Juárez y Solidaridad, están ubicadas en la zona noreste del estado de Quintana Roo. Estas ciudades tienen la mayor población del estado. De acuerdo con la información del Censo de Población 2020, aproximadamente el 67% de la población vive en estos dos municipios (INEGI, 2020). Ambas ciudades son de alta importancia turística y económica, también hay un flujo continuo de personas relacionado con la búsqueda de oportunidades laborales. Los datos de migración del estado indican que el 42.6% de los inmigrantes llegaron a Quintana Roo en busca de trabajo, el 30.8% para reunirse con su familia y el 10.6% por cambio u oferta de trabajo (INEGI, 2021).

Además del acelerado crecimiento demográfico, la estacionalidad climática de la zona también impacta los indicadores de calidad del agua. El clima en la región está representado por las temporadas de secas (marzo a mayo), lluvias (junio a octubre) y nortes (noviembre-febrero) (Schmitter *et al.*, 2002). En el estado de Quintana Roo, Conagua (2021) reportó valores de 51.9 a 70.4 mm de precipitación mensual de marzo a mayo, de 112.7 a 242.3 mm de junio a octubre y de 42.2 a 114.5 mm de noviembre a febrero (Tabla 1.1). En la temporada de lluvias se presentan los mayores flujos de agua pluvial hacia el acuífero, que a su vez producen cambios naturales en las tasas de infiltración y escorrentía y modifican los valores de los parámetros de calidad del agua (Leal-Bautista *et al.* 2020, Smith *et al.* 2020).

Tabla 1.1 Precipitación y temperatura en Quintana Roo en el 2021

Quintana Roo	Nortes		Secas			Lluvias					Nortes	
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Precipitación (mm)	79.5	39.5	54.3	51.9	70.4	242.3	113.5	172.5	210.7	112.7	114.5	42.2
Temperatura (°C)	24.6	25.5	26.5	28.5	29.3	29.0	29.4	29.3	29.1	28.5	25.6	25.6

Fuente: Conagua (2021)

En relación con los servicios de saneamiento del agua, solo el 73.8% de la población en Quintana Roo tiene drenaje conectado a la red pública, el 24% emplea fosa o tanque séptico (INEGI, 2021). En Benito Juárez hay cinco plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR): Planta Norponiente, Norte, Playa Blanca, Isla Azul y Planta Sur (AGUAKAN, s.f.). El 31% de la población en Cancún emplea tanques sépticos para almacenar sus aguas

residuales (Olivos-Ortiz, 2021). En Playa del Carmen se encuentra la PTAR Saástun-Já la, el 40% de la población emplea fosas sépticas (Tomasini-Ortiz *et al.* 2015). El volumen de descarga anual de pozos de inyección de uso público urbano vinculadas a plantas de tratamiento es de 54.25 Mm³ para Benito Juárez (56 pozos) y 13.18 Mm³ para Solidaridad (15 pozos), el 83% de los totales están asociados con el turismo (CONAGUA, 2022a).

1.1.3 Los cuerpos de agua kársticos urbanos

Existen diferentes características de las formas kársticas, algunos autores los clasifican dentro de alguna de las siguientes categorías mostradas en la Figura 1.4: (i) cavernas o cuevas inundadas, las cuales se caracterizan por la disolución de la roca caliza de forma horizontal que pueden estar total o parcialmente inundadas; (ii) cenotes típicos, los cuales pueden tener forma de jarra o cilindros donde la disolución de la roca es de forma vertical; y (iii) las aguadas o placas en forma de estanque, éstos almacenan principalmente agua de lluvia y tienen una conexión limitada o nula con el agua subterránea debido al bloqueo de los conductos de disolución por efecto de la sedimentación (Gaona-Vizcayno *et al.* 1980, Schmitter-Soto *et al.* 2002). Todas estas clasificaciones en este trabajo se pueden englobar como cuerpos de agua dulces kársticos urbanos (CADKU) debido a la naturaleza del suelo.

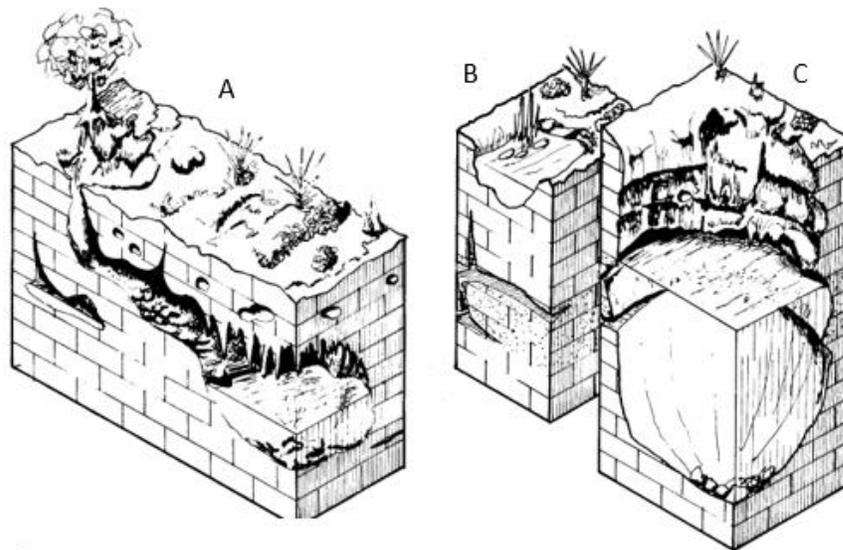


Figura 1.4. Tipos de cenotes: A) caverna, B) Aguada, C) cenote típico (Gaona-Vizcayno et al., 1980)

En el municipio de Solidaridad, la Dirección de Ecología ha identificado 200 cuerpos de agua urbanos, los cuales están registrados en el Sistema de Información Geográfica (SIG)-Geolander con acceso público (<http://www.geolander.com.mx/solidaridad/mapa.html>). Por otra parte, la Dirección de Ecología de Benito Juárez realiza trabajos de limpieza en 24 cuerpos de agua como parte del “Programa de saneamiento e integración social de humedales de agua dulce de la ciudad de Cancún”. En la mayoría de ellos hay presencia de residuos sólidos, ya sea porque son empleados directamente como basureros por los ciudadanos que habitan las zonas aledañas o porque debido su profundidad y su conexión con la superficie, los plásticos y otros residuos son acarreados por acción del aire o de la escorrentía de la lluvia. Estos desechos dañan la calidad del agua y la biota nativa.

La deficiente gestión de los residuos sólidos urbanos (basura que se genera en los hogares, por ejemplo, residuos de comida, botellas, bolsas, etc.), así como la proliferación de las letrinas y fosas sépticas afectan considerablemente la calidad del agua subterránea (Borbolla-Vázquez *et al.*, 2020) e impactan negativamente la imagen urbana (López-Maldonado y Berkes, 2017). En los asentamientos irregulares de Cancún y Playa del Carmen el estado de conservación de los CADKU es más crítico; ante la falta de saneamiento y de servicios públicos de drenaje suficientes, muchas personas vierten el agua residual de origen doméstico a fosas, cuevas o cenotes, la cual se infiltra en el agua subterránea (Olivos-Ortiz, 2021). Por lo anterior, es más probable que los CADKU se encuentren afectados en un mayor grado por contaminantes de materia orgánica, microorganismos entéricos, detergentes y aceites que los cuerpos de agua no urbanos.

La Evaluación de Ecosistemas del Milenio, clasifica a los servicios ecosistémicos en cuatro categorías: servicios de soporte, de provisión, de regulación y culturales; y estos, están vinculados con determinantes de bienestar en seguridad, acceso a recursos naturales y salud (Alcamo *et al.*, 2009). Según López-Monzalvo (2017), hay 13 servicios ecosistémicos que brindan los cenotes; se pueden destacar los servicios culturales (turismo, recreación, educación ambiental, investigación y cosmovisión maya), servicios de provisión (agua para uso humano), servicios de regulación (almacenamiento, conducto o transportación de agua) y los servicios de soporte (captación de agua de lluvia y preservación de la biodiversidad). Su uso en actividades recreativas es importante dado que éstas representan una de las

múltiples formas en cómo se relaciona la sociedad con su entorno inmediato y el beneficio intangible que obtiene el ser humano de esa interacción, además el turismo en cenotes de la Península de Yucatán también es una actividad económica rentable que impulsa las acciones de conservación de estos sitios (López-Maldonado *et al.*, 2017). En gran medida, la interacción del hombre con estos cuerpos de agua implica el contacto directo con el agua, por lo que es fundamental que esté libre de contaminantes que pudieran afectar la salud pública.

Normativamente, para determinar si un cenote es apto para uso recreativo es suficiente con que el nivel de *E. coli* no sea mayor a 200 NMP/100 mL (COFEPRIS, 2022). Sin embargo, para tener criterios complementarios de calidad del agua que permitan conocer su grado de contaminación y facilitar la comparación con distintos cuerpos de agua dulce, es necesario medir parámetros físicos, químicos y biológicos. Además, de acuerdo con la NOM-011-CONAGUA-2015, la naturaleza es considerada como el primer usuario del agua, por ello, esta norma indica la protección de las aguas nacionales, incluidos los acuíferos, y el mantenimiento del equilibrio de los ecosistemas.

1.1.4 Normativa para la descarga de aguas residuales

Los indicadores de calidad del agua se pueden agrupar para formar un índice de calidad del agua (ICA), el cual evalúa de forma cuantitativa al cuerpo de agua. La NOM-001-SEMARNAT-2021 establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores que son propiedad de la nación. Esta norma fue actualizada de la NOM-001-SEMARNAT-1996, la cual establecía los límites máximos permisibles (LMP) por el tipo de cuerpo de agua receptor (ríos, embalses naturales y artificiales, aguas costeras y humedales naturales) y el tipo de uso (público, agrícola, recreación, etc.). La CONAGUA (2013), ha indicado que los cenotes y las cavernas se encuentran dentro de la extensa clasificación de humedales naturales, los cenotes pertenecen al sistema lacustre y las cavernas a los sistemas fluviales. La principal modificación de la NOM 001-SEMARNAT-2021 es la reclasificación de los cuerpos receptores, donde ya se incluye a los que están vinculados con suelos kársticos. Los LMP para las descargas no deben de propiciar la degradación de los cuerpos de aguas de acuerdo con sus características fisicoquímicas, por lo cual la 001-SEMARNAT-2021 puede ser una guía para identificar el grado de contaminación de los cuerpos de agua kársticos (Tabla 1.2).

Según el IMTA (2021), otros cambios entre la NOM-001-1996 y la NOM-001-2021 consisten en la adición al título de la norma del siguiente texto: “a fin de proteger, conservar y mejorar la calidad de las aguas y bienes nacionales” la cual indica que los límites permisibles de descarga de aguas residuales tienen un fin específico de protección del recurso hídrico y los ecosistemas acuáticos. Igualmente, se redujeron los límites permisibles del nitrógeno total, el fósforo total y la temperatura, y se incluyeron los parámetros de color verdadero, toxicidad aguda y demanda química de oxígeno. Asimismo, se eliminaron los parámetros de materia flotante y sólidos sedimentables. Además, se introduce el concepto de valor instantáneo, lo cual permite evaluaciones sin contemplar el promedio diario por muestras (Tabla 1.2).

En la Tabla 1.2 se indica las diferencias en los límites permisibles de la normativa NOM-001-SEMARNAT-2021 para suelos kársticos y la NOM-001-SEMARNAT-1996 para humedales naturales (considerando que anteriormente se indicó que los CADKU forman parte de la clasificación de humedales). De acuerdo con estos LMP se pueden evaluar la calidad del agua de los CADKU y comparar dichas normativas.

Tabla 1.2 Límites Máximos Permisibles de los indicadores de calidad del agua de la NOM-001-SEMARNAT-2021 y 1996.

Indicadores	Normativa		
	NOM-001-SEMARNAT-2021: Suelos Kársticos	NOM-001-SEMARNAT-1996: Humedales naturales	
Parámetros (mg/L)	Valor instantáneo	Promedio diario	
Temperatura	35	40	
Grasas y aceites	21	25	
Sólidos suspendidos	28	125	
Demanda Química de Oxígeno	84	NA	
Carbono Orgánico Total	21	NA	
Nitrógeno Total	30	NA	
Fósforo Total	10	NA	
Huevos de helmintos (huevos/litro)	1	5	
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100 mL)	200	1000 NMP Coliformes fecales	
<i>Enterococcus faecalis</i> (NMP/100 mL)	200	NA	
pH	6-9	NA	
Color verdadero	Longitud de onda: 436 nm, 525 nm, 620 nm	Coefficiente de absorción espectral máximo 7.0 m ⁻¹ , 5.0 m ⁻¹ 3,0 m ⁻¹	NA
Toxicidad aguda	2 a 15 minutos de exposición	NA	
Materia flotante	NA	Ausente	
Sólidos sedimentables	NA	2	
Demanda biológica de oxígeno	NA	150	

*Si la concentración de cloruros es menor a 1000 mg/L se analiza y reporta DQO. Si ésta es mayor o igual a 1000 mg/L se analiza y se reporta COT. *Si la conductividad eléctrica es menor a 3500 µS/cm se analiza y se reporta *Escherichia coli*. Si la conductividad eléctrica es mayor o igual a 3500 µS/cm se analiza y se reporta *Enterococcus faecalis*. NA = No Aplica.

1.1.5 Indicadores de calidad del agua en México

El informe de estadísticas del agua en México en 2021 indica que, en el 2020, la Red de Monitoreo de Calidad de la Comisión Nacional del Agua contempló 5034 sitios de análisis a nivel nacional (CONAGUA, 2022b). La evaluación del agua de CONAGUA (2022b) se basó en cuatro indicadores principales para aguas superficiales: demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST) y coliformes fecales (CF). Los resultados del estudio en la Región hidrológica-administrativa XII-Península de Yucatán indicaron que el 66.7% de los sitios en el parámetro DBO se categorizaron como aceptables (>6 y ≤ 30), el 21.4% como buena calidad (>3 y ≤ 6) y el 11.9% contaminada (>30 y ≤ 120); en DQO el 28.6% aceptable (>20 y ≤ 40) y el 69% contaminada (>40 y ≤ 200); la evaluación de los SST clasificó a, 78.3% como excelente (≤ 25 mg/l) y el 16.2% como buena calidad (>25 y ≤ 75); mientras que, de acuerdo con los resultados de los coliformes fecales, el 68.6% como excelentes (≤ 100), el 6.8% de buena calidad (>100 y ≤ 200), el 20.3% aceptables (>200 y ≤ 1000), el 4.1 % contaminada (>1000 y $\leq 10,000$) (CONAGUA, 2022b). El semáforo de calidad del agua de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua (RENAMECA) establece un conjunto de parámetros más extenso para aguas superficiales lóticas, lénticas y costeras: DBO, DO, Toxicidad aguda (*Daphnia magna* y *Vibrio fisheri*), Enterococos, *E. coli*, Coliformes fecales, sólidos suspendidos totales y de oxígeno disuelto (CONAGUA, 2022a)

Una de las evaluaciones más importantes de la calidad del agua subterránea es la determinación de la salinización mediante la medición de los sólidos disueltos totales (SDT), la clasificación indica que las aguas son dulces si la concentración es menor a 1000 mg/l, ligeramente salobres en el rango de 1000 – 2000 mg/l, salobres entre 2000 - 10,000 mg/l y salinas si son mayores a 10,000 mg/l. Los puntos de monitoreo localizados en el noreste de la península de Yucatán reportan cuerpos de agua subterránea dulces y ligeramente salobres cerca de la línea de costa de acuerdo con los sólidos disueltos totales (CONAGUA, 2022b). Por otra parte, RENAMECA establece un semáforo de calidad de aguas subterráneas que contempla fluoruros, coliformes fecales, Nitratos, Arsénico Total, Cadmio Total, Cromo Total, Mercurio Total, Plomo Total, Alcalinidad, Conductividad eléctrica, Dureza, Sólidos Disueltos Totales-Riego Agrícola, Sólidos Disueltos Totales-Salinización, Magnesio Total, Hierro Total (CONAGUA, 2022a). De acuerdo con CONAGUA (2022a) en el 2020 en la

península de Yucatán de los 125 sitios de monitoreo (85 de Yucatán, 25 de Campeche y 15 de Quintana Roo), 41 presentaron calidad excelente, 74 sitios con calidad aceptable con incumplimiento en SDT, Conductividad eléctrica y Dureza (esto asociado a las condiciones geohidrológicas que limitan los usos del agua), y 10 sitios con calidad limitada por incumplimiento de parámetros derivados a descarga de aguas residuales, industriales y agropecuarias (CONAGUA, 2022a).

1.1.6 Estudios de la calidad del agua en cuerpos kársticos en la ciudad de Cancún

La información existente sobre la calidad del agua en los CADKU se ha enfocado principalmente a la determinación de las concentraciones de bacterias coliformes y nutrientes. Por ejemplo, en la ciudad de Cancún, Rosiles-González *et al* (2017), Hernández-Flores (2018) y Cejudo-Espinosa *et al.* (2018) reportaron valores de algunos parámetros fisicoquímicos del agua de cenotes urbanos (Tabla 1.3). Se pueden identificar concentraciones elevadas de nutrientes con valores superiores a 0.05 mg/L de nitritos y de 0.2 mg/L de fosfatos. Cejudo-Espinosa *et al.* (2021) presentaron las tarjetas del estado de conservación de 12 cuerpos de agua (cenotes, cavernas y humedales) de Cancún, en donde mencionan que algunos cenotes no cumplen los LMP (de acuerdo con la normativa de protección de vida acuática de agua dulce) de la concentración de cloruros, oxígeno disuelto, nitrógeno amoniacal, y fosfatos, conductividad eléctrica, así como presencia de aluminio y zinc disueltos en el agua (Tabla 1.4).

Tabla 1.3. Valores reportados de los parámetros fisicoquímicos en cenotes de Cancún.

Sitio	Temp. (°C)	pH	CE (mS/cm)	SDT (mg/L)	ORP (mV)	N - NO ₂ ⁻ (mg/L)	N - NH ₄ ⁺ (mg/L)	PO ₄ ³⁻ (mg/L)
1 (516496.5E - 2344610.5N)	27.2-29.4	7.5-7.9	0.23-0.44	0.14-0.26*				
2 (513415.7E- 2339645.8N)	26.7-27.8	8.0-8.3	0.96-1.27	0.60-0.80*				
RV1 (s. u).	27.18-27.35	7.49-8.34	0.21-0.85	0.14/-0.26	5.80/-0.48			
R962 (s. u).	27.23-30.20	8.22-8.50	0.93-0.51	0.60	60.53			
LC34 (s. u).	27.2±0.3	7.1±0.3	0.28±0.02	0.14±0.01	30.2±65.6	0.03±0.01	0.04±0.03	n.c.
Hondada (512878.696E- 2340742.893N)	28.5±0.2	7.5±0.2	0.53±0.01	0.27±0.01	0.7±98.4	0.02±0.01	1.17±0.01	0.75±0.14
La Piedra (515312.92E- 2336897.124N)	27.1±0.3	6.9±0.5	0.61±0.02	0.32±0.01	41.3±198.1	0.13±0.06	0.12±0.06	0.22±0.10
La Horquilla (515682.533E- 2341599.27N)	24.5±0.6	7.1±0.6	0.48±0.10	0.24±0.04	119.6±95.8	n.d.	0.41±0.07	0.99±0.78

Fuente: Sitios 1 y 2 en Rosiles-González *et al* (2017), Sitio RV1 y R962 en Hernández-Flores (2018); y LC34, Hondada, La Piedra y La Horquilla en Cejudo (2018). *g/mL, n.c.=no cuantificado, n.d.= no detectado, s.u.= sin ubicación geográfica.

Tabla 1.4 Riesgos ambientales en cenotes, cavernas y humedales de Cancún.

Cenote	Ubicación geográfica	Oxígeno disuelto (5 mg/l)	Nitrógeno amoniacal (0.06 mg/l)	Fosfatos (0.025 mg/l)	Cloruros (250 mg/l)	Elevada conductividad eléctrica.	Presencia de aluminio disuelto en agua.	Presencia de zinc disuelto en agua.
Rancho Viejo	516547 E, 2344597 N	X	X				X	X
Parque región 68	518559 E, 2342260 N	X	X	X			X	X
Región 225	513987 E, 2342569 N	X	X		X	X		
Región 230	515681 E, 2341566 N	X	X	X			X	X
Región 100 (caverna)	513163 E, 2340001 N	X	X	X	X	X		
Región 100	513438 E, 2339681 N	X	X		X	X	X	X
Región 97	513422 E, 2338657 N	X	X	X			X	X
Avante	506901 E, 2333581 N	X	X			X		
Región 510	514093 E, 2337107 N	X		X	X	X	X	
Región 523	515310 E, 2336893 N	X	X			X	X	
Región 524	514929 E, 2336684 N		X		X	X	X	
Parque Kabah	S M 53	X	X	X			X	

Fuente: Elaborado con información de Cejudo-Espinosa *et al.* (2021). (x)=No cumple con los LMP para protección de la vida acuática.

Borbolla *et al.* (2020) realizaron la evaluación de coliformes totales y fecales de 10 cenotes de la ciudad, encontrando en todos ellos la presencia de estas bacterias (Tabla 1.5). Antes, Rosiles-González *et al.* (2017) reportaron coliformes totales y *Escherichia coli* en 2 cenotes de Cancún (Tabla 1.5) y en Rosiles-González *et al.* (2019) reportaron la presencia de coligafos entéricos. Además de estas bacterias, Rosiles-González *et al.* (2017) y Hernández-Flores (2018) reportaron la presencia de virus entéricos (Pepper Mild Mottle Virus, Norovirus, Adenovirus y Reovirus) en dos cenotes de esta ciudad, confirmando la contaminación del agua subterránea por aguas residuales. Por otra parte, Medina-Moreno *et al.* (2014) ha reportado hidrocarburos aromáticos policíclicos en cenotes Cancún y Playa del Carmen.

Tabla 1.5 Valores reportados de coliformes en cenotes de Cancún.

Sitios	Coliformes totales (NMP/100mL)		Coliformes fecales- <i>E. coli</i> (NPM/100mL)	
	Secas	Lluvias	Secas	Lluvias
1	1011	1011	39	<1
2	>2420	1011	<1	<1

C1	93	>2400	93	240
C2	>2400	253	>2400	253
C3	240	>2400	240	157
C4	1100	>2400	1100	>2400
C5	>2400	>2400	>2400	>2400
C6	>2400	>2400	>2400	110
C7	<3	>2400	<3	157
C8	<3	>2400	<3	>2400
C9	93	253	4	79
C10	21	>2400	7	>2400

Fuente: Sitio 1 y 2 Rosiles-González *et al* (2017) y C1-C10 Borbolla-Vázquez *et al* (2020).

Leal-Bautista *et al.* (2019) y Muñoz-Euan (2019), reportaron parámetros fisicoquímicos en pozos de Cancún (Tabla 1.6), en donde destacan valores elevados de nitritos y nitratos, así como la presencia de trihalometanos relacionados con la presencia de cloro y materia orgánica.

Tabla 1.6 Valores reportados de los parámetros fisicoquímicos en pozos de Cancún.

Parámetros	Leal-Bautista <i>et al.</i> 2019		Muñoz-Euan (2019)
	2011	2013	Enero-febrero 2018
DBO_5	*4.11 – 7.12 mg/L		
Nitritos	0.2 – 2.3 mg/l		
Nitratos	0 – 15.5 mg/L		1.1 – 18.7 mg/L
SAM			0 – 0.5 mg/L
Sulfatos			6.6 – 46.1 mg/L
Coliformes fecales	<1 – 2 NMP/100 mL	<1 – 3 NMP/100MI	<1 NMP/100 mL
Coliformes totales	<1 – 5 NMP/100 mL	<1 – 10.9 NMP/100 mL	<1 – >219.6 NMP/100 mL
Compuestos trihalometanos	1 pozo	6 pozos	

Fuente: Leal-Bautista *et al.* (2019) y Muñoz-Euan 2019. * Aumentó en las temporadas de lluvia de 2011 a 2013

1.1.7 Estudios de la calidad del agua en cuerpos kársticos en la ciudad de Playa del Carmen

Herrera-Silveira (1999) reportó parámetros fisicoquímicos de cenotes de Yucatán, Campeche y Quintana Roo, de los cuales, 4 se encuentran localizados en la carretera Playa del Carmen-Tulum, asociados a núcleos de población. Por su parte, De la Lanza *et al.* (2006), realizaron el análisis de calidad del agua en tres temporadas de un ciclo anual en cenotes costeros del municipio de Solidaridad, los cuales tienen alta afluencia turística (Tabla 1.7). En los estudios se identifican concentraciones elevadas de conductividad eléctrica, nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal, coliformes fecales y DQO.

Tabla 1.7 Parámetros fisicoquímicos y biológicos de cenotes de Playa del Carmen-Solidaridad.

Parámetro	Herrera-Silveira (1999)				de la Lanza <i>et al</i> (2006)				
	Azul	Cristalino	Chacmool	Cálica	Sacbé	Xcaret	Xcaret Rio	Edén	Calavera
OD (mg/L)	2.88	3.34	3.76	5.27					
CE (mS/cm)	0.882	0.524	2.351	2.528	1-2	19-21	25-30	4-5	3-5
Salinidad (UPS)					1.2	11-14	15-18.75	2-3.2	2-3.2
T (°C)	25.3	25.2	25.6	28	20-24	25	25-26	24-25	24-26

pH	8.12	7.99	7.9	8.38	6.9-8.1	6.9-8.1	6.9-8.1	7.7-8.1	6.9-7.5
Ortofosfatos (μM)					6-16	6-14	7-17.5	6.5-8	13.5-23.5
Alcalinidad (meq/L)	4.77	5.32	6.25	2.98					
NO_3 (μM)	52.21	47.23	50.02	11.35	9-24	7-20	12-39	7-39	11-39
NO_2 (μM)	0.15	0.15	0.06	0.08					
NH_4 (μM)	1.39	2.78	3.38	2.90					
Nitrógeno T μM					15-40	10-28	25-53.57	5-53.57	15-16
S.R.P. (μM)	1.09	1.16	0.03	0.17					
S.R.S. (μM)	47.24	39.79	29.29	10.34					
Clorofila a (mg/m^3)	0.68	0.39	2.76	1.30					
Coliformes F (NPM/100 mL)					0-4000	500	0-8000	2000	500
Enterococos (NPM/100 mL)					370	450	80	20	10
DQO (mg/L)					2.5-10	4-35	6-32	11-45	2-16
DBO (mg/L)					1-1.7	1-2.4	1.9-3.7	1-2.1	0.7-2.5

Fuente: Herrera-Silveira (1999) y de la Lanza *et al* (2006). SRP (Fósforo reactivo soluble), SRS (sílice reactivo soluble). Los resultados de de la Lanza (2006) son estimados de acuerdo con las gráficas de su artículo.

Por otra parte, la asociación Centinelas del Agua (2021) elaboró la red de monitoreo de calidad del agua para cenotes y pozos en Playa del Carmen. En la Tabla 1.8 se indican los valores reportados y se comparan con los límites máximos permisibles para (i) la protección de la vida acuática, (ii) para uso y consumo humano, y (iii) para contacto primario (recreativo).

Tabla 1.8 Parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos de cenotes y pozos de monitoreo de Playa del Carmen.

Parámetro	Valores reportados	LMP de calidad del agua para protección de la vida acuática (CE-CCA-001/89)	LMP de calidad del agua para uso y consumo humano (NOM-127)
Oxígeno disuelto	0.01-8.31 mg/l	5 mg/l	
Nitritos	0.004-0.063 mg/l	0.002 mg/l	0.05 mg/l
Nitratos	0.001-48.81 mg/l	0.04 mg/l	10 mg/l
Fosfatos	0.01-0.72 mg/l	0.002 mg/l	0.1 mg/l
Enterococos	1-11199 NMP/100 mL	LMP para contacto primario 200 NMP/ 100 mL	
Coliformes totales	1-24000 NMP/100 mL		2 NMP/100 mL

Elaborada con información de Centinelas del Agua (2021)

1.1.8 Índices de calidad del agua aplicados para agua subterránea

McClelland (1974) definió al ICA como “una expresión numérica que refleja la influencia compuesta de parámetros físicos, químicos y microbiológicos significativos de la calidad del agua”. Brown *et al.* (1970) fueron de los primeros en elaborar un ICA con base en el trabajo de Horton (Horton, 1965). Los autores resaltaron la importancia del ICA ya que éste contribuiría a identificar y monitorear los cambios de la calidad del agua y los resultados de la afectación sobre los ambientes acuáticos. Mediante un ICA se pueden representar los cambios de calidad del agua de un sitio a través del tiempo y/o comparar diferentes sitios. Brown *et al.* (1970) plantearon 35 parámetros a 142 profesionales relacionados con la calidad del agua para considerar los que deberían estar incluidos en el WQI (Water Quality Index,

por sus siglas en ingles) y su valor de significancia (de 1 al 5, considerando al 5 como el más importante), así como la adición de otros parámetros. Los parámetros que consideraron más representativos fueron: oxígeno disuelto, DBO₅, turbiedad, sólidos totales, nitratos, fosfatos, pH, temperatura, coliformes fecales, pesticidas y elementos tóxicos. El método consistió, primeramente, en brindarle un peso a cada parámetro considerado, posteriormente, determinar el valor medido que indicara la mejor y la peor calidad del agua (por ejemplo, 0 y 30 de BDO₅), representar en una escala del 0 al 100 (q_i), para que, finalmente mediante una multiplicación de su peso ponderado (w_i) se obtuviera una calificación para cada parámetro ($q_i * w_i$). La suma de todas las calificaciones conforma el ICA (WQI). De este modo un solo valor puede clasificar la calidad del agua desde excelente hasta de mala calidad.

Sánchez *et al.* (2016) realizaron un ICA del sistema acuífero kárstico del sur de Quintana Roo consideraron los límites máximos permisibles del agua potable de la NOM-127-SSA1-1993, contemplaron los siguientes parámetros: alcalinidad, dureza total, dureza de calcio, cloruros, sólidos totales disueltos, nitratos, sulfatos y sodio. Los autores emplearon la metodología de ICA ponderado de Brown *et al* (1970) y Horton (1965) contemplando valores máximos y mínimos. Consideraron los parámetros de mayor peso debido a la afectación en la salud humana, seguida de los indicadores de intrusión salina, y a los parámetros más estables les asignaron un menor peso. Mediante la aplicación del ICA y mapas de distribución identificaron las diferencias de la calidad del agua en la temporada de lluvias entre el año 2002 y el 2012, indicando el aumento de sulfatos, dureza total, cloruros y sodio; y la disminución de la calidad del agua de sitios específicos vinculados posiblemente al crecimiento poblacional, actividades agrícolas e influencia de aguas marinas.

Otros investigadores, como Moran-Ramírez *et al.* (2019) igual han aplicado índices de calidad de agua para sistemas subterráneos con morfología kársticas, en este caso el estudio fue en la Reserva de la Biosfera Sierra del Abran Tanchipa en San Luis Potosí para valorar a la calidad del agua para uso potable, agrícola, pesca, vida acuática y uso recreativo mediante parámetros de la hidrogeoquímica del agua subterránea con base a la metodología de ponderación de Brown y McClelland (1973). Un punto importante mencionado que se debe considerar en los sistemas acuáticos kársticos es la dinámica e interacción con la superficie dependiendo del uso del suelo.

Cerón *et al.* (2021) expuso una revisión y análisis de los diferentes índices de calidad del agua que mayormente se han empleado a nivel internacional exclusivamente para el agua subterránea, los principales son WQI (Soltan, 1999), GWQI (Saeedi *et al.*, 2010) y IWQI (Mukate *et al.* 2019), los cuales principalmente evalúan NO_3^- , PO_4^{3-} , Cl^- , sólidos disueltos totales, demanda biológica de oxígeno, algunos metales pesados (Cd, Cr, Ni, Pb), elementos mayores (K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-}) y pH. Cada uno de los índices de calidad tienen diferente selección de parámetros, ponderación, metodología, rango de evaluación o categorías, límites máximos permisibles, así como valores mínimos y máximos de cada parámetro. Es importante indicar que de acuerdo este autor es fundamental identificar las características del sistema acuático para la adaptación de cualquier índice de calidad del agua.

Smith *et al.* (2020) aplicó el ICA de Sánchez *et al.* (2016), modificando el parámetro de dureza por alcalinidad, para evaluar agua subterránea asociada a zonas agrícolas y no agrícolas de Yucatán en tres temporadas climáticas (secas, lluvias y frío); identificaron que en las zonas no agrícolas existe una mejor calidad que en las zonas agrícolas de acuerdo con el valor del ICA.

1.2 JUSTIFICACIÓN

La información sobre el grado de contaminación y su variabilidad durante las temporadas climáticas de los cuerpos de agua kársticos urbanos de Cancún y Playa del Carmen es de utilidad para instancias públicas y privadas relacionadas con la gestión del agua subterránea en la región. Además, la comparativa entre la NOM-001-SEMARNAT-1996 y la NOM-0001-SEMARNAT-2021 contribuye a identificar la diferencia de la calidad del agua de los CADKU con base en los diferentes parámetros y límites máximos permisibles que consideran ambas normativas. Por otra parte, la construcción de un ICA con parámetros que consideren el impacto de las aguas residuales es fundamental para identificar la calidad de cuerpos de agua urbanos, independientemente de que la concentración de los minerales sea excelente.

1.1 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

- ¿Es la actual NOM-001-SEMARNAT-2021 apropiada para generar un Índice de Calidad del Agua que permita determinar la calidad del agua de cuerpos de agua kársticos urbanos de Cancún y Playa del Carmen?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Generar un Índice de Calidad del Agua con base en la NOM-001-SEMARNAT-2021 para evaluar las condiciones de calidad del agua en cuerpos de agua kársticos urbanos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Cuantificar las condiciones físicas, químicas y biológicas en diez cuerpos de agua kársticos urbanos de Cancún y Playa del Carmen.
- Desarrollar un Índice de Calidad del Agua que permita comparar la calidad del agua en cuanto al riesgo a la salud y del ecosistema.
- Comparar el índice de Calidad del Agua en base a las condiciones de la NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-001-SEMARNAT-2021 en cuanto al riesgo a la salud humana y del ecosistema.

1.3 HIPÓTESIS

Un ICA elaborado con base en la NOM-001-SEMARNAT-2021 será eficaz para evaluar la calidad del agua de cenotes urbanos kársticos de Cancún y Playa del Carmen.

CAPÍTULO 2

2.1 METODOLOGÍA

2.1.1 Descripción del área de estudio

El Estado de Quintana Roo se encuentra ubicado en la parte sureste de México, colinda con los estados de Yucatán y Campeche, así como con el Mar Caribe. La ciudad de Cancún está ubicada en el Municipio de Benito Juárez, en 21°9' N y 86°51' W. La ciudad de Playa de Carmen pertenece al municipio de Solidaridad, ubicada a 20°38 N y 87°4 W (Geo Map 2.9.7).

El clima es cálido subhúmedo en el 99% de la superficie del estado; la temperatura media es de 26°C, el promedio máximo es de 33°C y el promedio mínimo de 17°C; la precipitación anual es aproximadamente 1300 mm (INEGI, 2021). La vegetación está constituida por selva media subperennifolia, manglar, tular y zonas inundadas, los cuales han sufrido procesos de degradación debido al desarrollo turístico-urbano (Pérez-Villegas *et al.* (2000).

La existencia de las dolinas o cenotes en la región se debe a los procesos erosionantes que se presentan en la matriz geológica, principalmente constituida por roca caliza que corresponde a la era Cenozoica. Su origen proviene de los sedimentos de los arrecifes coralinos, se identifican tres tipos de estratos de roca: consolidada (laja), sacab y la coquina (roca con abundantes macroporos); sus principales relieves son la planicie y los montículos (Estrada *et al.*, 2019).

De acuerdo con la información de INEGI, en el Censo de Población y Vivienda 2020 en Quintana Roo habitan 1,857,985 personas (INEGI, 2021). En el municipio de Benito Juárez viven 911,503 personas y en el municipio de Solidaridad viven 333,800 personas. La mayor cantidad de población del estado (67%) se localiza en estos dos lugares. El estado ha experimentado un gran crecimiento demográfico pasando de 9.1 miles de habitantes en 1910 a 1,857.9 miles de habitantes en el 2020 (INEGI, 2021). En ambas ciudades la economía se centra en actividades terciarias relacionadas a bienes y servicios turísticos. En el 2016, las actividades terciarias en el estado aportaron el 86.5% al PIB estatal (INEGI, 2021).

2.1.2 Estrategia de muestreo

Se seleccionaron cinco cenotes ubicados en Cancún y cinco cenotes en Playa del Carmen de acceso público ubicados dentro de la zona urbana. Las campañas de muestreo se realizaron en dos épocas contrastantes: lluvias y secas. El muestreo de la temporada de secas se realizó en el mes de mayo 2022 y el muestreo de la temporada de lluvias se realizó en agosto del mismo año (Figura 2.1 y 2.2). *In situ* se midieron el pH, la temperatura, la conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales mediante un multiparamétrico de pluma previamente calibrado, marca Walfront y modelo 9909-SP.



Figura 2.1 Probabilidad diaria de precipitación en Cancún. Fuente: © WeatherSpark.com



Figura 2.2 Probabilidad diaria de precipitación en Playa del Carmen. Fuente: © WeatherSpark.com.

A continuación, en la Tabla 2.1 se indican las coordenadas de los puntos de muestreos.

Tabla 2.1 Coordenadas de los cenotes de donde se obtendrán las muestras.

Sitios en Cancún	Simbología	X	Y	Sitios en Playa del Carmen	Simbología	X	Y
Avante	C1	21.10328964	-86.93345055	La Guadalupeana	PC1	20.6833121	-87.05467399
Carabanchel	C2	21.13972146	-86.91465463	Mayapan	PC2	20.67109618	-87.07072467
Chac Mool	C3	21.15830484	-86.87048234	Flor del ciruelo	PC3	20.66860325	-87.08527933
Ocho	C4	21.18531179	-86.86524231	Los trigales	PC4	20.6558136	-87.07844128
Región 230	C5	21.17568475	-86.84895258	Parque de la Madre	PC5	20.65332858	-87.06981305

En la Figura 2.3 se indica la ubicación y la imagen representativa de los cenotes de la ciudad de Cancún. El cenote C1 (Avante) es un cenote semiabierto tipo caverna, ubicado en una zona verde en una de las colonias de la periferia de la ciudad, es de tipo recreativo, hay presencia de peces y algas epiliticas, y eventualmente, en la periferia del cenote se observan desechos sólidos (botellas de plástico, latas de aluminio u hojalara y envolturas de polietileno, entre otros) y presencia de fauna nosciva. El cenote C2 (Carabanchel) es un cenote de tipo caverna ubicado en una zona verde, en una de las colonias que no tienen el servicio de abastecimiento de agua y drenaje, en el cenote existe la presencia de peces, anfibios y murciélagos, por lo cual en el agua se identifica una capa de sedimentos espesa (probablemente guano). El cenote C3 (Chacmol) es muy somero, de tipo caverna, semiabierto y está ubicado en un parque en el centro de la ciudad. Se observa la presencia de peces y algas epiliticas, y perros y gatos callejeros en la periferia. También se visualiza la presencia de residuos sólidos urbanos. El cenote C4 (Ocho) es profundo, de forma típica semiabierto con 2 orificios en donde se visualiza el espejo de agua. Está ubicado en un parque y es de uso recreativo. Se identifican animales callejeros en la periferia y presencia de basura. El cenote C5 (Región 230) es un cenote semiabierto de tipo caverna, somero de coloración amarillenta, ubicado dentro de un parque de uso público, existe presencia de peces y macrófitas, así como residuos sólidos urbanos y animales callejeros en la periferia.

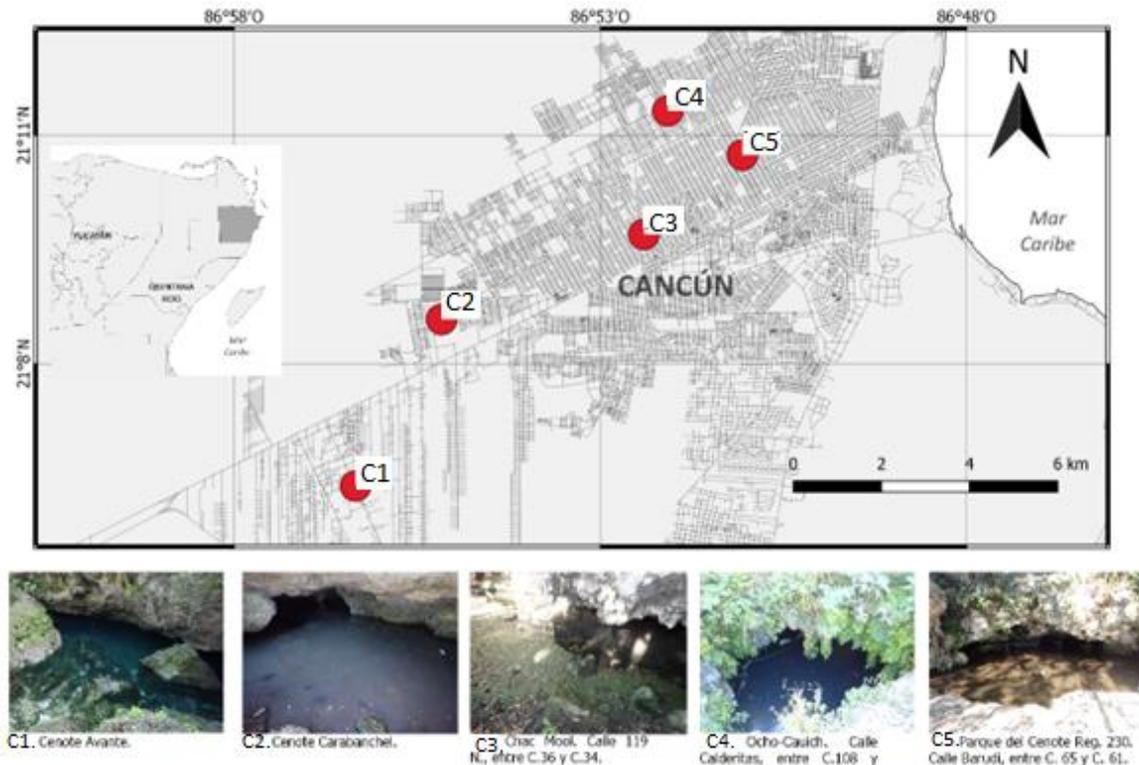


Figura 2.3 Sitios de muestreo en Cancún, Quintana Roo.

En la Figura 2.4 se presenta un mapa con la ubicación y la imagen representativa de los cenotes de la ciudad de Playa del Carmen. El cenote PC1 (Guadalupana) es abierto de tipo caverna, ubicado en un parque público, existe la presencia de peces, algas epiliticas, así como basura y presencia de animales callejeros. El cenote PC2 (Mayapan) es de tipo semiabierto de tipo caverna, se ubica en un área verde con presencia cercana de residuos sólidos urbanos. El cenote PC3 (Flor del ciruelo) es un cenote semiabierto de tipo caverna, ubicado en un área verde, existe la presencia de peces, anfibios y murciélagos, igualmente se observa la presencia de residuos sólidos urbanos. El cenote PC4 (Trigales) es un cenote semiabierto de tipo caverna, ubicado en área verde, presencia de basura y animales callejeros en la periferia. El cenote PC5 (Parque de la madre) es un cenote semiabierto de tipo caverna ubicado en un parque público, ligeramente turbio con presencia de basura y animales callejeros en la periferia.

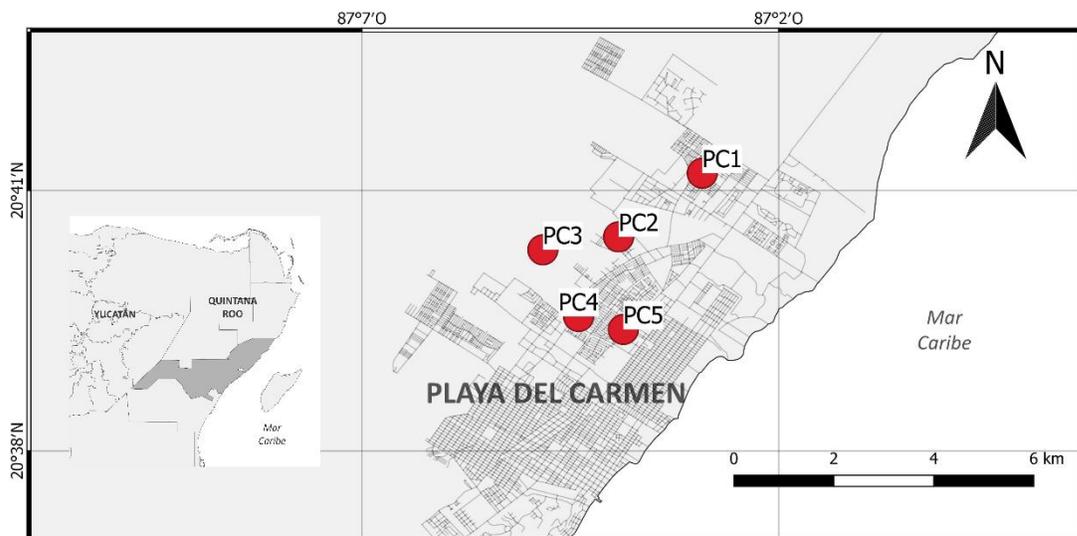


Figura 2.4 Sitios de muestreo en Playa del Carmen, Quintana Roo.

2.1.3 Colecta de muestras

La colecta de las muestras fue superficial, en los primeros 30 cm de la columna de agua, a 50 cm de la orilla. Las muestras se tomaron entre las 5:00 y 12:00 horas en el mes de mayo y agosto del 2022.

✚ Oxígeno disuelto (OD): Se colectaron 50 mL de muestra. El OD se fijó con 5 gotas de sulfato de magnesio y 5 gotas de azida alkali.

✚ Materia flotante: Se identificó la materia flotante por simple inspección visual o alternativamente se tamizaron en campo 3 L de agua a través de un tamiz de 3 mm. (modificado de NMX-AA-SCFI-2010).

✚ *Escherichia coli* y *Enterococos*: Se colectó un volumen mínimo de 100 mL en frascos estériles de polietileno de acuerdo con la NMX-AA-186-SCFI-2021 sin superar los 2/3 de la capacidad de almacenamiento de los frascos. Las muestras se almacenaron a 4°C hasta su procesamiento que fue dentro de la 24 horas posterior a la colecta.

✚ Demanda bioquímica de oxígeno al 5 día (DBO₅): Se colectaron 500 mL de agua en una botella de polietileno ámbar de acuerdo con la NMX-AA-028-SCFI-2001, verificando la nula presencia de burbujas (sello de agua). Las muestras se conservaron a 4°C hasta su análisis, que en ningún caso fue superior a las 24 horas después de la colecta.

✚ Huevos de Helminths: Se colectaron 5 L de agua en recipientes de plástico rígido previamente desinfectados con hipoclorito de sodio al 6%. Las muestras se conservaron a 4°C hasta el inicio de su procesamiento, no superior a 48 h después de la colecta (NMX-AA-113-SCFI-2012).

✚ Sólidos suspendidos: Se colectó 1 L de agua en envases de vidrio. Estas muestras se almacenaron hasta por 7 días a 4 °C. (NMX-AA-034-SCFI-2015)

✚ Sólidos sedimentables: Se colectó 1 L de agua, sin añadir preservantes. Se mantuvo a 4 °C hasta su análisis, almacenamiento máximo de 7 días (NMX-AA-004-SCFI-2000).

✚ Color verdadero: Se colectaron 100 ml de agua (sin contenido de aire) en botellas de vidrio ámbar previamente filtrados con un filtro de membrana de 0.22µm de tamaño de poro. Las muestras fueron almacenados a 4°C por un periodo no mayor a 5 días (PROY-NMX-AA-017-SCFI-2020).

✚ Demanda química de oxígeno (DQO): Se colectaron 30 ml de agua en botellas de polietileno, se añadió ácido sulfúrico concentrado hasta llegar a un pH ≤ 2. Las muestras se conservaron a 4°C ±2°C. El tiempo máximo de almacenamiento fue de 28 días (CHEMetrics, 2021; PROY-NMX-AA-030/2_SCFI-2008)

✚ Grasas y aceites: Se colectó 1 L de agua, las muestras se acidificaron con ácido sulfúrico (concentración 1:1) hasta alcanzar un pH ≤ 2. Las muestras se almacenaron hasta un máximo de 30 días (NMX-AA-005-SCFI-2013).

✚ Nitrógeno y fósforo total: Se colectaron 60 ml de agua sin filtrar a los que se les añadieron 8 ml del reactivo de oxidación (50 g de persulfato de potasio, 30 g de ácido bórico, 350 ml de hidróxido de sodio, aforado a 1 L con agua destilada) por cada 60 ml de muestra (Valderrama, 1981). Para su preservación las muestras se congelaron hasta su procesamiento.

✚ Toxicidad aguda y carbono orgánico total. Se colectaron 30 ml de agua (sin contenido de aire) en frascos de vidrio ámbar de borosilicato. Estas muestras se conservaron en congelación. (NMX-AA-112-SCFI-2017).

2.1.4 Análisis de laboratorio de parámetros de calidad del agua

En la Tabla 2.2 se indican los parámetros medidos en el laboratorio, con su respectivo concepto de acuerdo con la Normativa Mexicana considerada para su análisis. Posteriormente se indica el procedimiento para su análisis.

Tabla 2.2 Parámetros y normativa relacionada.

Parámetro	Concepto	Normativa
Oxígeno disuelto	Oxígeno gaseoso disuelto en el agua.	NMX-AA-012-SCFI-2001
Materia flotante	Materia que puede quedarse retenido en una malla de 2.8 a 33 mm de abertura y/o que flota en la superficie del agua.	NMX-AA-SCFI-2010
Coliformes totales	Bacterias aerobias y anaerobias facultativas, Gram negativas, de la familia <i>Enterobacteriaceae</i> que expresan la enzima β -D-galactosidasa.	NMX-AA-186-SCFI-2021
<i>E. coli</i>	Coliforme fecal termo tolerante, relacionado con las heces de animales de sangre caliente, de la familia <i>Enterobacteriaceae</i> que expresa las enzimas β -D-galactosidasa y β -D-glucuronidasa.	NMX-AA-186-SCFI-2021
Enterococos intestinales	Cocos, anaerobios facultativos, Gram positivos, de la familia <i>Enterobacteriaceae</i> (<i>E. faecalis</i> , <i>E. faecium</i>).	NOM-210-SSA1-2014
Demanda Química de Oxígeno	Concentración de oxígeno equivalente al oxidante dicromato consumida por la materia orgánica e inorgánica disuelta y suspendida.	PROY-NMX-AA-030/2-SCFI-2008
Demanda Biológica de Oxígeno	Oxígeno requerido por grupos de poblaciones microbianas para la oxidación de la materia orgánica durante un periodo de 5 días en condiciones estables.	NMX-AA-028-SCFI-2001
Carbono Orgánico Total	Indicador directo de materia orgánica en el agua menos la diferencia del carbono inorgánico.	PROY-NMX-AA-187-SCFI-2020.
Color verdadero	Color del agua filtrada (con membrana de 0.45 o 0.22 μ m), en la cual se han eliminado los sólidos suspendidos y solo se mantienen las sustancias disueltas.	PROY-NMX-AA-017-SCFI-2020
Sólidos suspendidos	Material sedimentable, en suspensión o coloide que son retenidos por filtros de fibra de vidrio con porosidad de 1,5 μ m.	NMX-AA-034-SCFI-2015
Sólidos sedimentables	Cantidad de sólidos que en un tiempo determinado se depositan en el fondo de un recipiente en condiciones estáticas.	NMX-AA-004-SCFI-2000.
Grasas y aceites	Sustancias que se encuentran en el agua, las cuales son extraídas con hexano: grasas, aceites, jabones, ceras e hidrocarburos (olefinas y parafinas).	NMX-AA-005-SCFI-2013
Huevos de Helmintos	Organismos parásitos de humanos, animales y vegetales, que presentan un riesgo a la salud humana en los estadios infecciosos.	NMX-AA-113-SCFI-2012
Nitrógeno Total	Nitrógeno inorgánico disuelto en el agua (nitratos, nitritos, amonio) más el nitrógeno orgánico particulado (de organismos acuáticos, detritus y otras partículas orgánicas) y disuelto.	Digestión método Valderrama, 1981. Analizador automatizado de química húmeda de flujo continuo
Fósforo Total	Ortofosfato inorgánico disuelto en el agua y fosfato orgánico disuelto posteriormente de un proceso de digestión de la materia orgánica.	
Toxicidad Aguda	Inhibición mayor del 10%, en relación con el cultivo control, de la bacteria <i>Vibrio fischeri</i> al exponerse con una muestra de agua en un lapso determinado.	NMX-AA-112-SCFI-2017

2.1.4.1 Oxígeno disuelto

En el laboratorio se realizó el método Winkler. A cada muestra se le añadieron 10 gotas de ácido sulfúrico del Kit de oxígeno disuelto portátil, marca Hanna. Posteriormente se tituló con tiosulfato de sodio hasta visualizar el cambio de color violeta a transparente. El volumen de mililitros empleados en la titulación se multiplicó por diez para obtener los mg/L de oxígeno disuelto, como describe en la siguiente ecuación:

$$mL (10) = \frac{mg}{L} O_2$$

mL= son los mililitros empleados en la titulación para el cambio de color.

2.1.4.2 Materia flotante

En campo se identificó de forma visual la presencia o ausencia de materia flotante en el cuerpo de agua. Como herramienta, se llevaron a campo mallas circulares de 3 mm de abertura, en el cual se filtrarían 3 litros de agua (NMX-AA-SCFI-2010). Sin embargo, en todos los sitios la materia flotante se identificó visualmente.

2.1.4.3 Coliformes totales e indicadores fecales

En este estudio se usó un método cromogénico validado en la normativa de México NMX-AA-186-SCFI-2021 y NOM-210-SSA1-2014. Se utilizó el método selectivo Colilert y Enterolert, marca Idexx, para la medición de *E. coli* y *Enterococcus*. El principio de este se basa en la metabolización de 4-metil-umberifelona, que emite fluorescencia, por lo tanto, los pocillos fluorescentes son positivos (Yakub *et al.* 2002). Las muestras se recolectaron en frascos estériles con capacidad de 150 mL y se refrigeraron a 4°C hasta su análisis. En una campana de siembra se añadió el reactivo Colilert/Enterolert a 100 mL de muestra, después, estas se colocaron en las placas Quianti-Tray/2000 y se sellaron. Como blanco control se utilizó agua desionizada y marina estéril. Posteriormente, se incubaron a 37.5°C para *E. coli* y 41°C para *Enterococos* durante 24 y 48 horas, tras lo cual se cuantificaron los pocillos positivos. Para la cuantificación se utilizaron las tablas de NMP del productor, las cuales tienen un intervalo de confianza del 95%. El rango de medición del método es de 0 a ≥ 2419 NMP/100 mL.

2.1.4.4 Demanda bioquímica de oxígeno de 5 días (DBO₅).

La técnica para la determinación de DBO₅ conforme a la NMX-AA-028-SCFI-2001 se fundamenta en la diferencia del oxígeno disuelto en 5 días. Se empleó agua de dilución, cuya preparación consistió en añadir 1 mL de las disoluciones de sulfato de magnesio (2.25g de sulfato de magnesio heptahidratado diluido en un 100 ml de agua), disolución de cloruro de calcio (2.75g de cloruro de calcio anhidro en diluido en 100 ml de agua), disolución de cloruro férrico (0.025g de cloruro férrico hexahidratado diluido en 100 ml de agua) y disolución amortiguadora de fosfatos (0.085g de fosfato monobásico de potasio, 2.175 de fosfato bibásico de potasio, 3.34g de fosfato dibásico de sodio heptahidratado y 0.17 g de cloruro de amonio, disuelto en 100 ml) por cada litro de agua. Antes de su uso, el agua de dilución se saturó con aire filtrado.

La dilución realizada fue del 50% en frascos Winkler de 300 mL. La medición del oxígeno disuelto se realizó por el método electrométrico con un electrodo de membrana al inicio y al final de la incubación. La incubación se realizó a 20°C por 5 días, eliminando toda la luz para evitar la fotosíntesis. La ecuación para conocer la concentración se describe a continuación:

$$\frac{OD_i \frac{mg}{L} - OD_5 \frac{mg}{L}}{\% \text{ de dilución expresado en decimales}}$$

OD_i = oxígeno disuelto inicial.

OD_5 = oxígeno disuelto después de 5 días.

2.1.4.5 Demanda química de oxígeno (DQO)

La medición de DQO se realizó mediante el kit LR COD (rango de 0-150 mg/L) con viales marca CHEMetrics, el cual consiste en la determinación de la materia orgánica oxidable: la muestra reaccionó con una solución de acida de dicromato de potasio ante la presencia de plata como catalizador. El ion dicromato ($Cr_2O_7^{2-}$) se reduce a ion crómico (Cr^{3+}), este se mide colorimétricamente y se representa como mg/L de oxígeno consumido (CHEMetrics, 2021).

Se digirieron 2.00 mL de muestra homogenizada en cada vial, considerando un blanco reactivo, en un bloque digestor a 150 °C durante 2 horas. Después del enfriamiento se procedió a realizar la lectura en espectrofotómetro a 420 nm, teniendo en cuenta el blanco

reactivo como el blanco del espectrofotómetro debido a que se mide la reducción del cambio de color. Se empleó la siguiente ecuación para determinar mg/L:

$$DQO = (-331) * (\text{absorbancia}) - 0.6$$

2.1.4.6 Carbono orgánico total

El análisis de carbono orgánico total se realizó en el equipo TOC-V, marca SHIMADZU, el cual consiste en la combustión de los contaminantes a 680°C en un reactor catalítico. El CO₂ es generado es medido con el detector de infrarrojo no dispersivo para el análisis de Carbono Total. El carbono orgánico se obtiene mediante la diferencia del carbono inorgánico, el cual reacciona con el ácido fosfórico para obtener CO₂ de carbonatos y bicarbonatos. Esta técnica está reportada y ejecutada en México por la PROY-NMX-AA-187-SCFI-2020. Se realizó una previa filtración con un filtro de 0.45µm para retirar sólidos suspendidos.

2.1.4.7 Color verdadero

La materia húmica acuática es la principal causa del color amarillo-café de los cuerpos de agua superficiales y subterráneas, sin embargo, pueden estar presentes otros colorantes disueltos. La PROY-NMX-AA-017-SCFI-2020 indica que el color verdadero es el resultado del color de las sustancias disueltos en una muestra que previamente ha sido filtrada a través de una membrana de 0.45 o 0.22 µm. El método de análisis de la norma descrita es mediante los coeficientes de absorción espectral, la muestra previamente filtrada y con un pH conocido se analizó en el espectrofotómetro con celdas de 10 mm en tres diferentes longitudes de onda: 435 nm, 525 nm y 620 nm. La fórmula para analizar los coeficientes de absorción espectral es la siguiente:

$$\alpha(\lambda) = \left(\frac{A}{d} * f\right)$$

A = absorbancia de la muestra de agua a la longitud de onda (λ) determinada.

λ = longitud de onda.

d = paso de luz de la celda en mm.

f = factor utilizado para obtener el coeficiente espectral en m^{-1} (f = 1000).

2.1.4.8 Sólidos sedimentables

La materia sedimentable se determinó con la NMX-AA-004-SCFI-2000. Para la cuantificación se agitó la muestra de 1 L y se colocó en conos Imhoff graduados. Las muestras se dejaron sedimentar durante 40 minutos, en el transcurso, se agitaron las paredes con una vara de vidrio, finalmente se registró el volumen de los sólidos sedimentables reportándose como ml/L.

2.1.4.6 Sólidos suspendidos

La NMX-AA-034-SCFI-2015 establece el procedimiento por diferencia de pesos, para el análisis de sólidos en el agua. Los sólidos suspendidos pueden provenir de materia orgánica e inorgánica (como son fibras de microplásticos y carbonatos particulados).

Los filtros de fibra de vidrio y soportes de pesado se secaron en un horno a 105 °C durante 24 horas. Posteriormente, se trasladaron al desecador y se dejaron enfriar por 30 minutos o más, verificando el 0% de humedad. Se pesaron los soportes de pesado y los filtros en una balanza analítica (error: ±0.0001 g). Las muestras a temperatura ambiente se filtraron por vacío, 500 mL para las muestras transparentes y ligeramente turbias, y 50 mL para las muestras turbias o que se conoce que tienen una elevada cantidad de materia orgánica. Posteriormente se secaron los soportes de secado con el filtrado en el horno a 105°C durante 24 horas. Se llevó a masa constante en el desecador para enfriamiento hasta obtener 0% de humedad. Finalmente se pesó el soporte de secado con el filtrado seco para posteriormente emplear la siguiente fórmula.

$$SST \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{m_2(g) - m_1(g)}{V(ml)} * \frac{1000 ml}{1 l} * \frac{1000 mg}{1g}.$$

$SST \left(\frac{mg}{L} \right)$ = sólidos suspendidos totales.

m_2 = masa del soporte de secado con el filtrado (g).

m_1 = masa del soporte de secado con el filtro antes de la filtración (g).

V = volumen de la muestra (ml).

2.1.4.7 Grasas y aceites

La medición de grasas y aceites de acuerdo con la NMX-AA-005-SCFI-2013 se basa en la medición gravimétrica de sustancias extraídas con hexano. Se prepararon matraces de bola a peso constante mediante el secado en el horno a 105°C y enfriado en el desecador. Se filtraron entre 15 y 25 ml de una suspensión de tierra de diatomeas-sílice (10 g/l) aplicando vacío. La muestra acidificada se filtró aplicando vacío en el filtro previamente preparado con tierra de diatomeas. El material filtrante se transfirió a un cartucho, así como los residuos de las paredes internas del embudo (mediante papel filtro impregnado con hexano). El cartucho se secó en el horno a 105 °C durante 30 minutos. Posteriormente se colocó el cartucho en el sistema de extracción (equipo soxhlet) a temperatura constante, 20 ciclos por hora. Finalmente se recuperó el hexano, que posteriormente se evaporó, y las grasas y aceites remanentes se cuantificaron mediante la siguiente ecuación:

$$GyA(\text{grasas y aceites}) = \frac{m_f - m_i}{V_m}$$

m_f = masa del recipiente con la extracción.

m_i = masa del recipiente a masa constante.

V_m = volumen de la muestra.

2.1.4.8 Huevos de helminto

Los helmintos son organismos parásitos de humanos, animales y vegetales. Estos organismos poseen un opérculo, órganos diferenciados y un ciclo de vida comprendido por el estadio de huevos, etapa larval y adulto; los principales géneros de huevos parasitarios entéricos son *Ascaris*, *Trichuris*, *Toxocara*, *Ancylostoma* e *Hymenolepis* (Rocha *et al.*, 2016; Campos *et al.*, 2018). No todos los huevos de helminto son viables, ya que requieren de condiciones ambientales óptimas para su paso a larva. De acuerdo con De Victorica y Galván (2003) la viabilidad se puede determinar con colorantes (azul tripano, eosina, hematoxilina, verde de metilo, safranina o azul de metilo), ya que los huevos de helminto no viables son permeables (se tiñen), los viables no se tiñen. Los huevos de helminto contienen tres capas: una capa exterior formada por lipoproteínas, membrana intermedia de quitina y una membrana interna de lípidos, con los cual sobreviven a las condiciones extremas (Rocha *et al.*, 2016).

El método de análisis de acuerdo con la NMX-AA-113-SCFI-2012 está basado en sedimentación, decantación, flotación y técnicas bifásicas (diferencia de densidades al emplear dos reactivos no miscibles para la segregación de los huevos). La densidad de los huevos de helmintos se encuentra entre 1.05 g/mL y 1.18 g/mL, y la de los líquidos de flotación se sitúa entre 1,8 y 1.4 g/mL ($ZnSO_4$).

Las muestras de 5 litros se dejaron sedimentar toda la noche. El 90% del agua se eliminó por sifonamiento. El agua residual se filtró a través de un tamiz de 150 μ m para eliminar los sólidos mayores a esta talla. El tamiz se lavó con 5 L de agua potable. El agua de lavado se recuperó en conjunto con el sedimento filtrado en el garrafón donde se tomó la muestra. Se dejó reposar al menos 3 horas (se puede dejar toda la noche). Posteriormente se eliminó el 90% sobrenadante. Se colocaron el sedimento y el agua de enjuague en tubos de centrifuga y se centrifugaron a 1500 rpm por 5 minutos. El paquete sólido se resuspendió en 150 mL de solución de sulfato de zinc (de 1.3 g/mL de densidad). Se centrifugó a 2400 rpm por 5 minutos y se recuperó el sobrenadante en un frasco de 1 litro con agua destilada, se dejó sedimentar durante toda la noche y posteriormente se aspiró por vacío. La suspensión y el agua de enjuague se centrifugaron a 1500 rpm durante 3 minutos. Posteriormente, se aspiró por vacío el sobrenadante, se resuspendió el paquete sólido en 15 mL de la disolución de alcohol-ácido y se agregaron 10 mL de acetato de etilo. Se agitó suavemente, dejando escapar el gas que se desprende de la disolución. Se centrifugó 2000 rpm durante 3 min. Después de la formación de fases, se aspiró la fase superior y sobrenadante, dejando menos de 1 mL de este. Se homogeneizó el paquete y se cuantificó con cámara de conteo Sedgwick Rafter.

La cantidad de huevos en un litro se determinará con la siguiente fórmula:

$$H_L = \frac{H}{5}$$

H = número de huevos contados en la muestra

H_L = número de huevos por litro

5 = es el volumen de la muestra

2.1.4.9 Nitrógeno y fósforo total

Se realizó la digestión de la muestra con el reactivo de oxidación a 100°C en autoclave durante 30 minutos para convertir las especies nitrogenadas en nitratos, y las especies fosfatados en ortofosfatos. En el caso del NT se empleó el analizador automatizado de química húmeda de flujo continuo, marca SKALAR. En la cuantificación de PT se empleó el método reportado por OEWRI (Ozarks Enviromental and Water Resources Institute) por ácido ascórbico, molibdato de amonio y tartrato amonio-potasio en medio ácido, con previa neutralización, la medición se realizó a 650 nm en un espectrofotómetro.

2.1.4.10 Toxicidad aguda

La toxicidad aguda se evaluó con el método de prueba avalado por la NMX-AA-112-SCFI-2017, el cual indica que la medición de la luminiscencia de la bacteria *Vibrio fischeri* disminuye al exponerse a compuestos toxico durante un lapso. La normativa considera que la muestra es tóxica si existe una inhibición mayor al 10% de la luminiscencia con respecto al grupo control. Los compuestos tóxicos afectan los procesos metabólicos asociados con la respiración bacteriana de *Vibrio fischeri*, por lo cual disminuye la luminiscencia. El análisis de toxicidad aguda se realizó en el equipo Microtox ® modelo Deltatox II a 15 minutos.

2.1.5 Análisis estadísticos de datos

2.1.5.1 Análisis univariados

Diferencias de medias. Se determinó si los datos se ajustan a una distribución normal para poder proceder con el análisis de técnicas paramétricas. Esto se realizó con la prueba de Saphiro-Wilk para determinar normalidad. De acuerdo con normalidad se aplicó la prueba t de Student o la prueba U de Mann-Whitney, teniendo en cuenta cuatro grupos: Cancún lluvias (C_{II}), Cancún secas (C_s), Playa del Carmen lluvias (PC_{II}) y Playa del Carmen secas (PC_s). Se aplicó el mismo análisis para identificar si existen diferencias después de realizar el ICA.

2.1.5.2 Análisis multivariados

Análisis de Conglomerados: Se utilizaron para detectar las similitudes entre los conjuntos de variables de cada cenote. Se utilizó la técnica multivariada no paramétrica de análisis multidimensional no métrico (nMDA).

Similitudes entre grupos: Para determinar diferencias estadísticas entre los cuatro grupos se realizó un Análisis de Similitud (ANOSIM) a partir de una matriz de disimilitudes con base en el índice de Bray-Curtis. Para determinar qué variable o variables contribuyen más a las diferencias detectadas se utilizó la prueba SIMPER. Además, se aplicó el clúster de índice de similitud de Bray-Curtis para determinar la agrupación de los sitios y el porcentaje de similitud entre ellos.

2.1.6 Índice de calidad del agua

Se aplicó el procedimiento por T. Abbasi y S. A. Abbasi (2012) para la construcción de una ICA: (1) selección de parámetros, (2) transformación de los diferentes parámetros y dimensiones a una escala común, (3) asignación del peso cada parámetro, (4) agregación de los subíndices para conformar la medición del índice general. Los parámetros seleccionados fueron los contemplados en las NOM-001-SEMARNAT-2021 y NOM-001-SEMARNAT-1996. El peso específico se determinó tomando en cuenta la afectación para la salud humana y la vida acuática, brindándole un valor de 1 al 5, dónde 5 es de mayor importancia (Figura 2.5, Tabla 2.3).

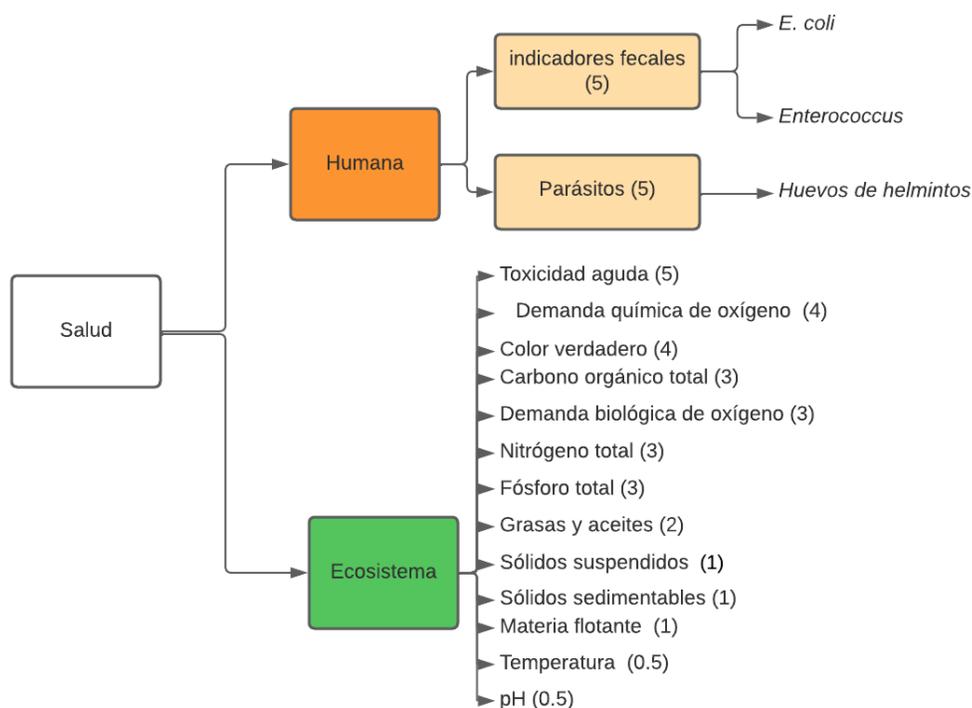


Figura 2.5 Jerarquía de los parámetros para la salud humana y del ecosistema.

En primera instancia se seleccionaron los parámetros que pueden ser un riesgo para la salud (puntuación 5), los cuales son los coliformes fecales (*E. coli*), los huevos de helmintos y la toxicidad agua. En México, la bacteria *Escherichia coli* con sus diferentes efectos (enteropatogénica, enteroxigénica, enteroagregativa, enterodifusa, productora de toxinas Shiga, y enteroinvasora) es el principal agente causal de diarrea en niños, que puede ser causa de mortalidad (Ríos-Muñiz, *et al.* 2019). También las infecciones parasitarias por protozoos y helmintos presentes en suelo y agua son un problema de salud pública, causante de enfermedades crónicas gastrointestinales, por lo cual se promueven los programas de desparasitación periódica y es recomendable las intervenciones a nivel ambiente (Vaz Nery *et al.* 2019).

Posteriormente, se le brinda importancia a los parámetros que pueden ser un riesgo para los ecosistemas. La toxicidad aguda, analizada por *Vibrio fisheri* no es un método en el cual se pueda identificar de forma directa la sustancia tóxica. Sin embargo, por el riesgo a que dicha sustancia sea tóxica para especies acuáticas se considera como un riesgo para la salud del ecosistema. En una revisión sobre la presencia de contaminantes del Gran Acuífero Maya, Moreno-Pérez *et al.* (2021) han indicado la presencia de componentes tóxicos como los PAHs (Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos) y los OCPs (Pesticidas organoclorados). Se le ha asignado un valor de 4 a DQO y color verdadero. El DQO mide compuestos orgánicos e inorgánicos, los últimos son compuestos donde los procesos de biodegradación son limitantes, por lo cual un parámetro importante en las plantas de tratamiento para disminuir el impacto ambiental (Rodríguez *et al.*, 2019). El color verdadero representa la concentración de las sustancias disueltas en el agua. En cuerpos de agua naturales estas sustancias corresponden mayormente materia húmica y residuos del metabolismo microbianos. Sin embargo, el color verdadero también puede provenir de otras sustancias provenientes de vertimientos coloreados en cuerpos de agua naturales, por ejemplo, productos de limpieza y desinfectantes, u otras sustancias industriales o domésticas con potencial tóxico o de desagrado organoléptico (Martínez y Osorio, 2018; Martins-Pinheiro, 2019; Rodríguez *et al.*, 2019).

A los parámetros como COT, DBO₅, NT y PT se les ha asignado el valor de 3. El COT, mide de forma directa el carbono orgánico biodegradable y no biodegradable (CONAGUA-

SEMARNAT, 2015a). El parámetro de DBO₅ mide exclusivamente la demanda biológica de oxígeno, es un parámetro importante dado a que debido a que la relación DBO/DQO es un indicador para identificar la presencia de compuestos no biodegradables en el agua (<0.3=No biodegradable) (Cañete, 2019). El fósforo total y el nitrógeno son nutrientes esenciales relacionados con la eutrofización, aunque los procesos sean más comunes en sistemas lénticos, igual puede haber crecimiento de perifiton, fitoplancton y macroalgas de manera constante o en temporada de sequías cuando la velocidad de los flujos de agua disminuye (Ramírez *et al.*, 1997). Para grasas y aceites se ha considerado un valor de 2, éste es un contaminante específico y su importancia radica en que al recubrir la superficie del agua crea una película que afecta el intercambio de oxígeno entre la atmósfera y el agua, además de que es difícil de biodegradar y por lo tanto afecta las actividades biológicas de las especies acuáticas (CONAGUA-SEMARNAT, 2015b).

A los parámetros de sólidos suspendidos, sólidos sedimentables y materia flotante se les asignó el valor de 1. La materia flotante, principalmente residuos plásticos, latas, redes de pesca, unicel, entre otras cosas, son componentes que no se degradan en lapsos de tiempo rápidos y se pueden acumular en los reservorios. Además, los plásticos en el ambiente pueden tener procesos de fragmentación, generando microplásticos, los cuales son un contaminante emergente del cual ya existen reportes de su presencia en el acuífero kárstico de la península de Yucatán (Mendoza-Olea *et al.* 2022). Los sólidos suspendidos en los sistemas acuáticos afectan la penetración de la luz y pueden causar afectaciones en los peces en sus procesos respiratorios y excretores, los sólidos sedimentables que contengan materia orgánica producen gases dañinos y disminución del oxígeno disuelto (CONAGUA-SEMARNAT, 2015b).

Los parámetros con menor puntuación (0.5) fueron pH y temperatura, ya que estos suelen no tener mucha variabilidad. Sin embargo, no se les debe de restar importancia; el pH de las aguas subterráneas suele ser neutro o máximo de 9, considerando que se tiene a los carbonatos como amortiguadores, pero se puede dar el caso que por lixiviados municipales o por desechos industriales se puede presentar valores extremos de pH (Chapelle, 2001). Por otra parte, para los nadadores es recomendable que el pH del agua se encuentre entre 6-9, y

la temperatura entre 15 - 35°C, en general la temperatura afecta distintos procesos químicos y biológicos en los sistemas acuáticos (CONAGUA-SEMARNAT, 2015b).

A través del peso específico se obtuvo el valor de la ponderación relativa (Tabla 2.3):

$$Wi = \frac{wi}{\sum_{i=0}^n wi}$$

Wi = ponderación relativa;

wi = peso de cada parámetro;

n = número de parámetros.

Tabla 2.3 Ponderación de los parámetros.

NOM-001-SEMARNAT-1996			
Parámetro	Peso	Ponderación relativa	LMP
Coliformes fecales	5	0.27	1000 NMP/100 mL
Huevos de helminto	5	0.27	5 huevos/L
DBO ₅	3	0.16	150 mg/L
Grasas y Aceites	2	0.11	25 mg/L
Sólidos suspendidos totales	1	0.05	125 mg/L
Sólidos sedimentables	1	0.05	2 ml/L
Materia flotante	1	0.05	Ausente (0/1)
Temperatura	0.5	0.03	40 °C
Total	18.5	1	
NOM-001-SEMARNAT-2021			
E. coli	5	0.11	200 NMP/100 mL
Huevos de helminto	5	0.11	1 huevo/L
Toxicidad aguda	5	0.11	Ausente (0/1)
DQO	4	0.09	854 mg/L
CAE 435 nm	4	0.09	7m ⁻¹
CAE 525 nm	4	0.09	5m ⁻¹
CAE 620 nm	4	0.09	3m ⁻¹
COT	3	0.07	21 mg/L
Nitrógeno total	3	0.07	30 mg/L
Fósforo total	3	0.07	10 mg/L
Grasas y aceites	2	0.05	25 mg/L
Sólidos suspendidos totales	1	0.02	28 mg/L
pH	0.5	0.01	6-9
Temperatura	0.5	0.01	35°C
Total	44	1	

La transformación de datos se realizó de forma lineal, aplicando el método descrito por Sánchez *et al* (2016), en el cual la concentración del parámetro se divide entre el LMP y posteriormente se multiplica por 100, obteniendo de esta forma el porcentaje cercano o que sobrepasa el LMP, la cual se ha denominado calificación de la calidad:

$$q_i = \frac{C_i}{S_i} \times 100$$

q_i = calificación de la calidad;

C = concentración de cada parámetro en $\frac{mg}{l}$;

S_i = valor estandar (LMP) de calidad del agua de acuerdo a normativa en mg/L.

El tipo de agregación del índice que se seleccionó fue el método de suma de índice ponderada. La calificación de la calidad es multiplicada por el peso relativo para formar un subíndice de cada parámetro.

$$S_{li} = (W_i)(q_i)$$

S_{li} = subíndice de cada parámetro.

La suma de todos los subíndices conforma el Índice de Calidad del Agua

$$ICA = \sum S_{li}$$

ICA = índice de calidad del agua;

$\sum S_{li}$ = suma del subíndice de cada parámetro.

De acuerdo con Sánchez *et al.* (2016), este resultado se divide en 5 categorías. Excelente (<50), Buena (50<100), Regular (100<200), Pobre (200<300) y Extremadamente Pobre (>300).

CAPÍTULO 3

3.1 RESULTADOS: VARIABILIDAD DE PARÁMETROS Y CALIDAD DE ACUERDO CON LA NORMATIVA MEXICANA

Los datos numéricos se expresan en el ANEXO A.

3.1.1 pH

En la temporada de secas el promedio de pH fue de 7.24 ± 0.08 (Máx. 7.84 en C2, Min. 6.92 en PC2), mientras que en la temporada de lluvias el promedio fue de 7.10 ± 0.08 (Máx. 7.56 en C2, Min 6.77 en PC2) (Figura 3.1). La prueba de Shapiro-Wilk indicó que los valores presentaron una distribución normal ($p > 0.05$). No se observaron diferencias significativas entre las temporadas de secas y lluvias de acuerdo con la prueba t ($p > 0.05$). Sin embargo, si existieron diferencias significativas entre el grupo de datos de Cancún y Playa del Carmen ($p < 0.05$). Todos los datos de pH se encontraron dentro de los LMP (6-9) de la NOM 001-SEMARNAT-2021.

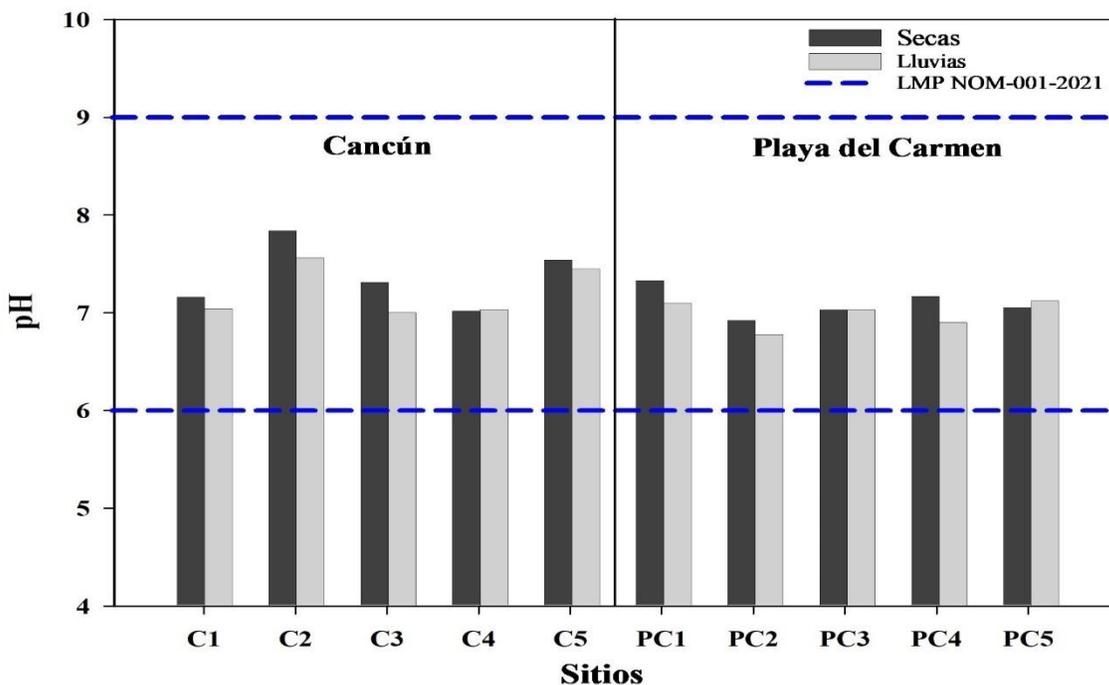


Figura 3.1 Valores de pH de Cancún y Playa del Carmen en temporada de secas y lluvias 2022. NOM-001-SEMARNAT-2021: LMP 6-9. NOM-001-SEMARNAT1996: No aplica.

3.1.2 Temperatura

En la temporada de secas el promedio de la temperatura fue de $25.47\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.23$ (Máx. $26.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ en C4, Min. $23.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ en PC2), mientras que en la temporada de lluvias el promedio fue de $26.58\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.14$ (Máx. $27.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ en C2, Min $25.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ en PC2) (Figura 3.2). Los valores se ajustaron a una distribución normal ($p > 0.05$). Existieron diferencias significativas entre las temporadas de secas y lluvias de acuerdo con la prueba t ($p < 0.05$). Igualmente, se observaron diferencias significativas entre el grupo de datos de Cancún y Playa del Carmen ($p < 0.05$). Todos los datos de temperatura se encontraron por debajo del LMP ($35\text{ }^{\circ}\text{C}$) de la NOM 001-SEMARNAT-2021 y por debajo del LMP ($40\text{ }^{\circ}\text{C}$) de la NOM 001-SEMARNAT-1996.

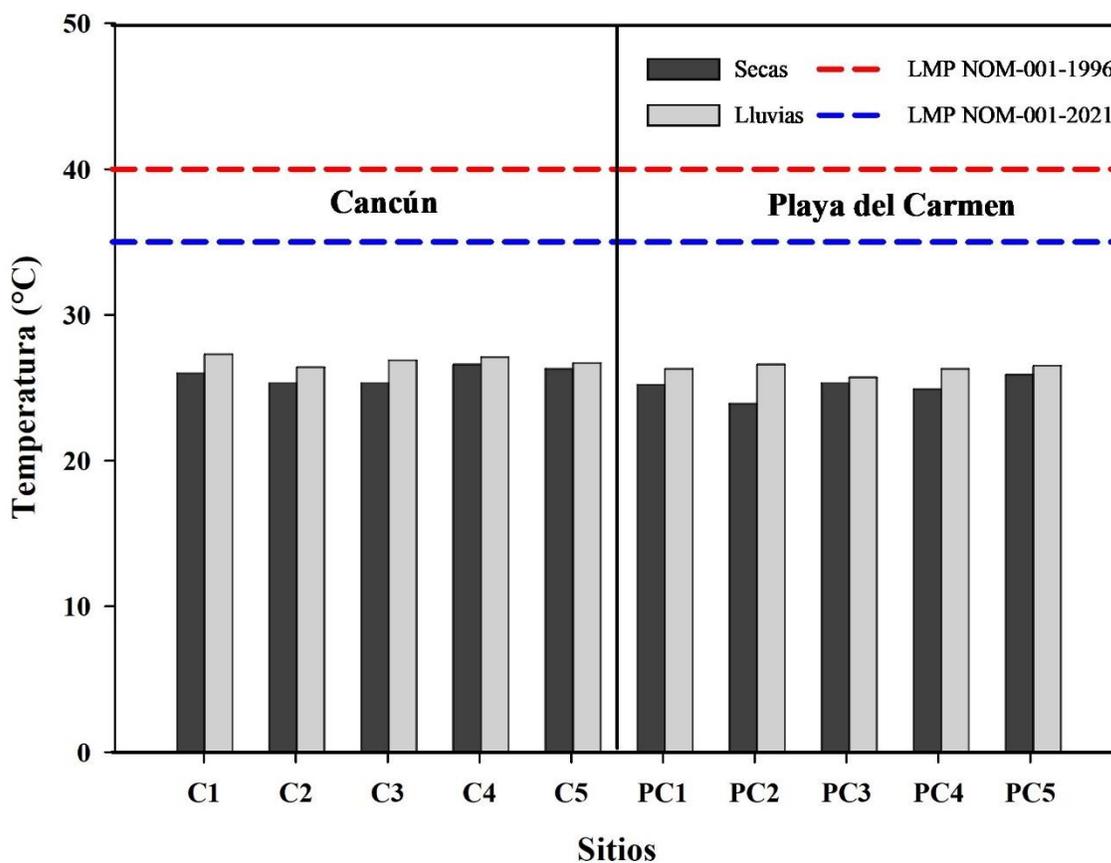


Figura 3.2 Valores de temperatura de Cancún y Playa del Carmen en temporada de secas y lluvias 2022. NOM-001-SEMARNAT-2021: LMP $35\text{ }^{\circ}\text{C}$. NOM-001-SEMARNAT1996: LMP $40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.1.3 Conductividad eléctrica

En la temporada de secas el promedio de la conductividad eléctrica fue de 2045.40 ± 421.71 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Máx. 5670 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en PC5, Min. 730 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en C2), mientras que en la temporada de lluvias el promedio fue de 1694.9 ± 267.94 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Máx. 3720 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en PC5, Min 721 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en C5) (Figura 3.3). Los valores no presentaron una distribución normal ($p < 0.05$), no existieron diferencias significativas entre la temporada de secas y lluvias de acuerdo con la prueba U de Mann-Whitney ($p > 0.05$). Mientras que sí existieron diferencias significativas entre el grupo de datos de Cancún y Playa del Carmen ($p < 0.05$). El sitio PC5 presentó valores de conductividad eléctrica mayores a 3500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

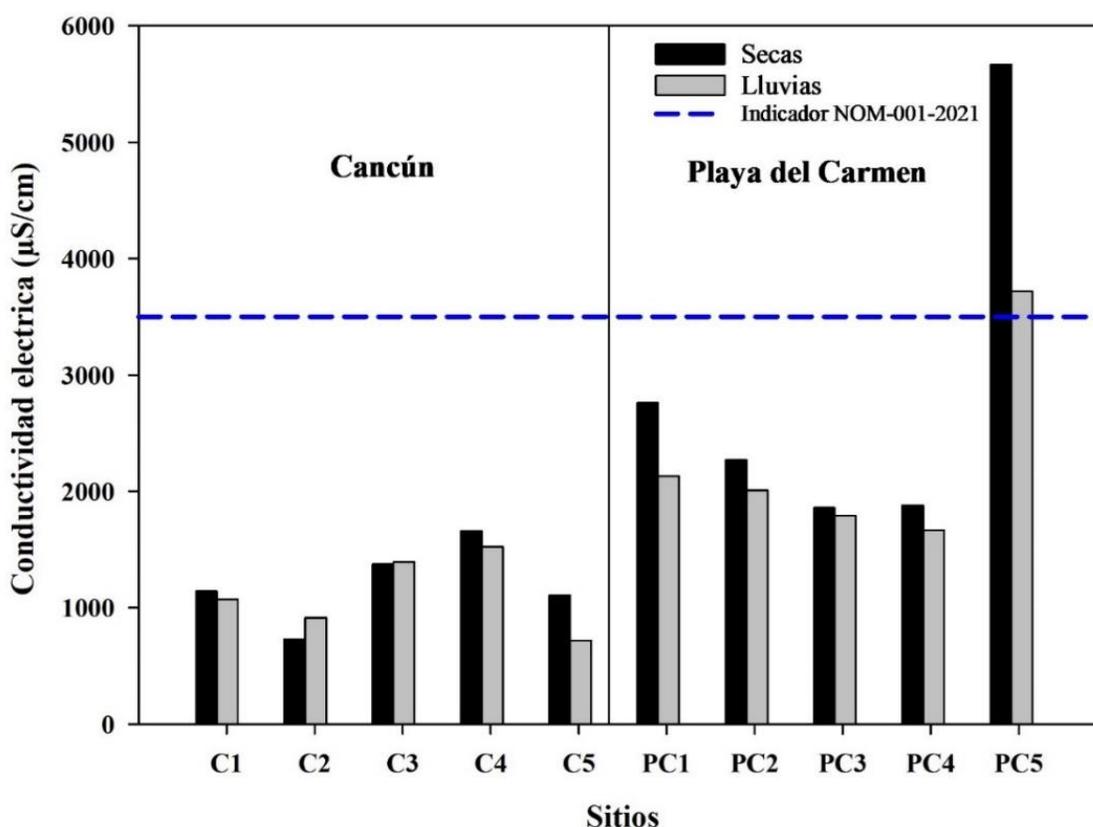


Figura 3.3 Valores de conductividad eléctrica de Cancún y Playa del Carmen en temporada de secas y lluvias 2022. De acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-2021 la conductividad eléctrica a partir 3500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ es un indicador de medición de Enterococos.

3.1.4 Sólidos disueltos totales

En la temporada de secas el promedio de sólidos disueltos totales fue de 1015.3 ± 210.12 mg/L (Máx. 2840 mg/L en PC5, Min. 368 mg/L en C2), mientras que en la temporada

de lluvias el promedio fue de $842.2 \text{ mg/L} \pm 136.14$ (Máx. 1860 mg/L en PC5, Min 308 mg/L en C5) (Figura 3.4). Los valores no presentaron una distribución normal ($p < 0.05$), no existieron diferencias significativas entre las temporadas de secas y lluvias de acuerdo con la prueba U de Mann-Whitney ($p > 0.05$). Mientras que sí existieron diferencias significativas entre el grupo de datos de Cancún y Playa del Carmen ($p < 0.05$).

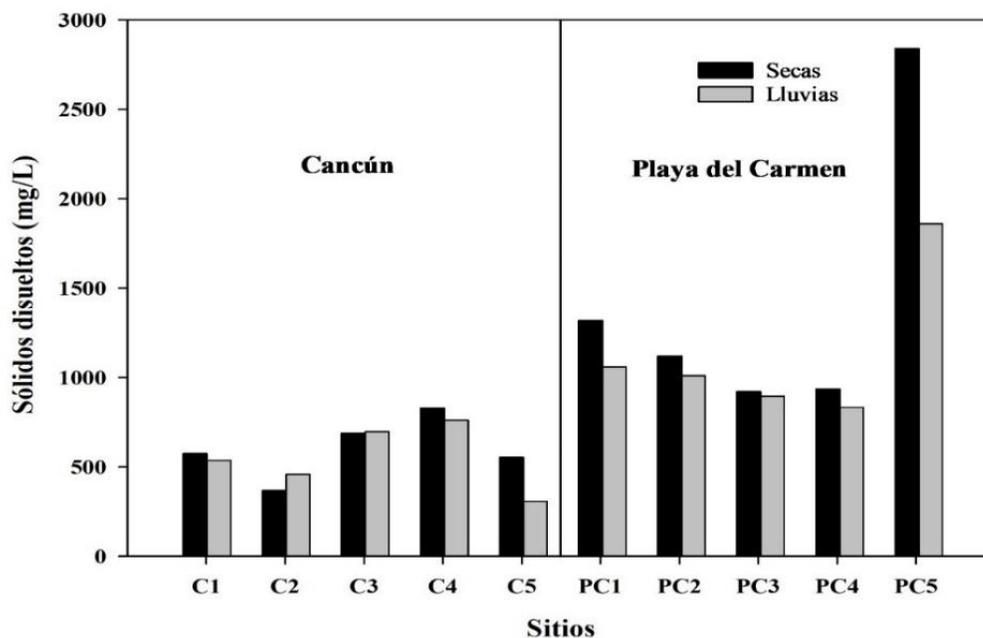


Figura 3.4 Concentración de sólidos disueltos totales de Cancún y Playa del Carmen en temporada de secas y lluvias 2022.

3.1.5 Oxígeno disuelto

En la temporada de secas el promedio de oxígeno disuelto fue de $2.01 \pm 0.49 \text{ mg/L}$ (Máx. 4.95 mg/L en C2, Min. 0.1 mg/L en PC5), mientras que en la temporada de lluvias el promedio fue de $2.19 \pm 0.27 \text{ mg/L}$ (Máx. 3.78 mg/L en PC5, Min 1.00 mg/L en PC4) (Figura 3.5). Los valores presentaron una distribución normal ($p > 0.05$), pero no se detectaron diferencias significativas entre la temporada ni entre las ciudades de acuerdo con la prueba t ($p > 0.05$).

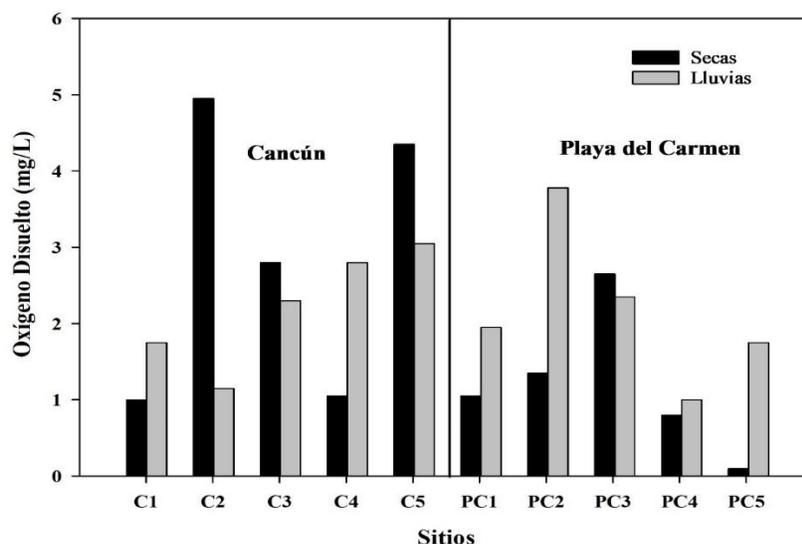


Figura 3.5 Concentración de oxígeno disuelto de Cancún y Playa del Carmen en temporada de secas y lluvias 2022.

3.1.6 Materia flotante

En todos los sitios se encontraron materia flotante no natural, principalmente botellas de plástico, bolsa de plástico, envolturas, latas y redes.

Tabla 3.1 Materia flotante en temporada de secas y lluvias 2022.

Sitio	Presente en secas	Observaciones	Presente en lluvias	Observaciones
C1	Si	bolsas, botellas, red	Si	bolsas, plásticos, alimentos, botellas.
C2	Si	Plásticos	Si	bolsas, botellas
C3	Si	botellas, bolsas	Si	botellas, bolsas, papel de baño
C4	Si	unicel, bolsas,	Si	unicel, bolsas, plásticos
C5	Si	bolsas, vasos, botellas	Si	unicel, botellas de PET
PC1	Si	Vaso	Si	bolsas y botellas
PC2	Si	Plásticos	Si	plásticos
PC3	Si	bolsas, plásticos	Si	lata
PC4	Si	botella de aluminio, botella de plástico	Si	botella de vidrio y plásticos
PC5	Si	bolsas y botellas	Si	bolsa de plástico, sobres, alimentos, hule

3.1.7 Coliformes totales

En la temporada de secas el promedio de coliformes totales fue de 1855.31 ± 250.88 NMP/100 mL (Máx. ≥ 2419.6 NMP/100 mL en C1, C2, C3, C5, PC1, PC5; Min. 298.7

NMP/100 mL en PC2), mientras que en la temporada de lluvias el promedio fue de 2217.28 ± 160.08 NMP/100 mL (Máx. ≥ 2419.6 NMP/100 mL en C1, C2, C3, C4, C5, PC1, PC3, PC5; Min 829.7 NMP/100 mL en PC2) (Figura 3.6). Los valores no presentaron una distribución normal ($p < 0.05$), no existieron diferencias significativas entre la temporada de secas y lluvias de acuerdo con la prueba U de Mann-Whitney ($p > 0.05$). Mientras que sí existieron diferencias significativas entre el grupo de datos de Cancún y Playa del Carmen ($p < 0.05$).

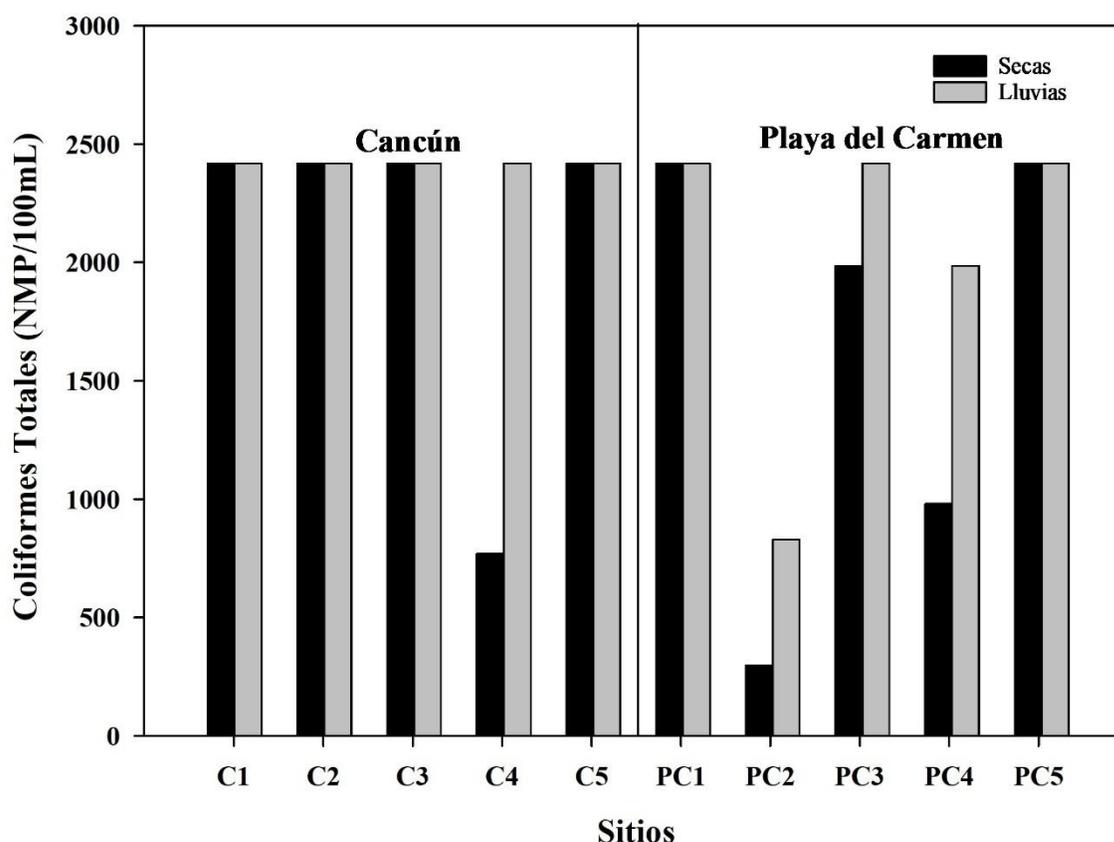


Figura 3.6 Concentración de Coliformes totales de Cancún y Playa del Carmen en temporada de secas (mayo) y lluvias (agosto) 2022. Nota: el límite máximo de detección es de 2419.6 NMP/100 mL.

3.1.9 *E. coli* y *Enterococcus*

En la temporada de secas el promedio de *E. coli* fue de 744.72 ± 219.25 NMP/100 mL (Máx. ≥ 2419.6 NMP/100 mL en C2, Min. 40.4 NMP/100 mL en PC2), mientras que en la temporada de lluvias el promedio fue de 1086.56 ± 338.32 NMP/100 mL (Máx. ≥ 2419.6 NMP/100 mL en C2, C3 PC5; Min 90.8 NMP/100 mL en C4) (Figura 3.7). Los valores no presentaron una distribución normal ($p < 0.05$), no existieron diferencias significativas entre

la temporada y tampoco entre ciudades de acuerdo con la prueba U de Mann-Whitney ($p > 0.05$). En el sitio PC5 que tuvo valores de conductividad eléctrica $> 3500 \mu\text{S}/\text{cm}$ se midió igualmente *Enterococcus*, tanto en temporada de secas como en lluvias se cuantificó ≥ 2419.6 NMP/100 mL. En la temporada de secas tres sitios (C2, C5, PC5) superaron el LMP (1000 NMP/100 mL) de la NOM-001-SEMARNAT-1996 y en temporada de lluvias cuatro sitios (C2, C3, PC1, PC5). En relación con la NOM-001-SEMARNAT-2021 todos los sitios superaron el LMP (200 NMP/100 mL) con excepción de C1 y PC2, en la temporada de lluvias los sitios que no superaron el LMP fueron C4 y PC4.

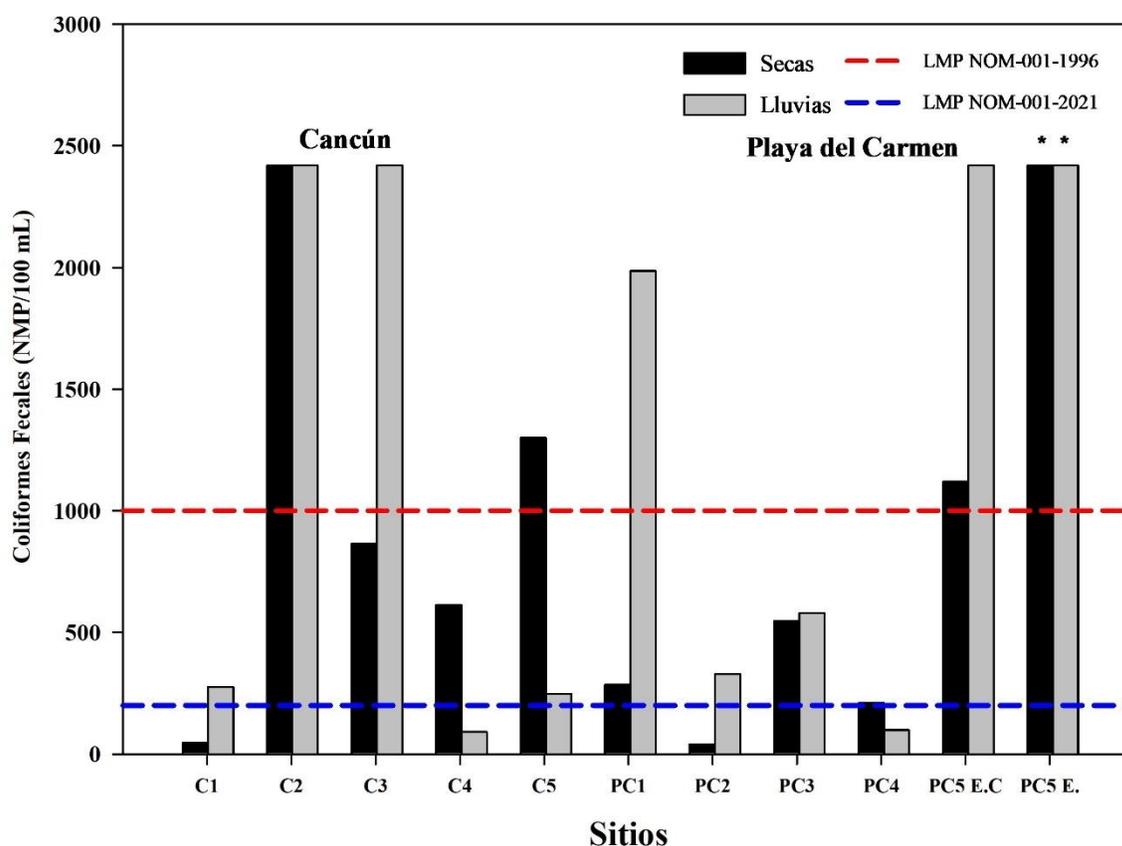


Figura 3.7 Concentración de *E. coli* y *Enterococcus* de Cancún y Playa del Carmen en las temporadas de secas (barras negras) y lluvias (barras grises) de 2022. La línea azul indica el valor del límite máximo permisible de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-2021.: LMP 200 NMP/100 mL. La línea roja indica el valor del límite máximo permisible de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT1996: LMP 1000 NMP/100 mL.

3.1.10 Demanda Biológica de Oxígeno al 5to día (DBO₅)

En la temporada de secas el promedio de DBO₅ fue de 5.78 ± 0.36 mg/L (Máx. 8.5 mg/L en C2, Min. 4.3 mg/L en C3), mientras que en la temporada de lluvias el promedio fue de $9.84 \pm$

0.82 mg/L (Máx.15.6 mg/L en C2; Min 6.7 mg/L en PC4) (Figura 3.8). Los valores presentaron una distribución normal ($p>0.05$), existieron diferencias significativas entre la temporada de secas y lluvias de acuerdo con la prueba t ($p<0.05$). No existieron diferencias significativas entre el grupo de datos de Cancún y Playa del Carmen ($p>0.05$). Todos los sitios se encontraron por debajo del LMP (150 mg/L) de la NOM-001-SEMARNAT-1996.

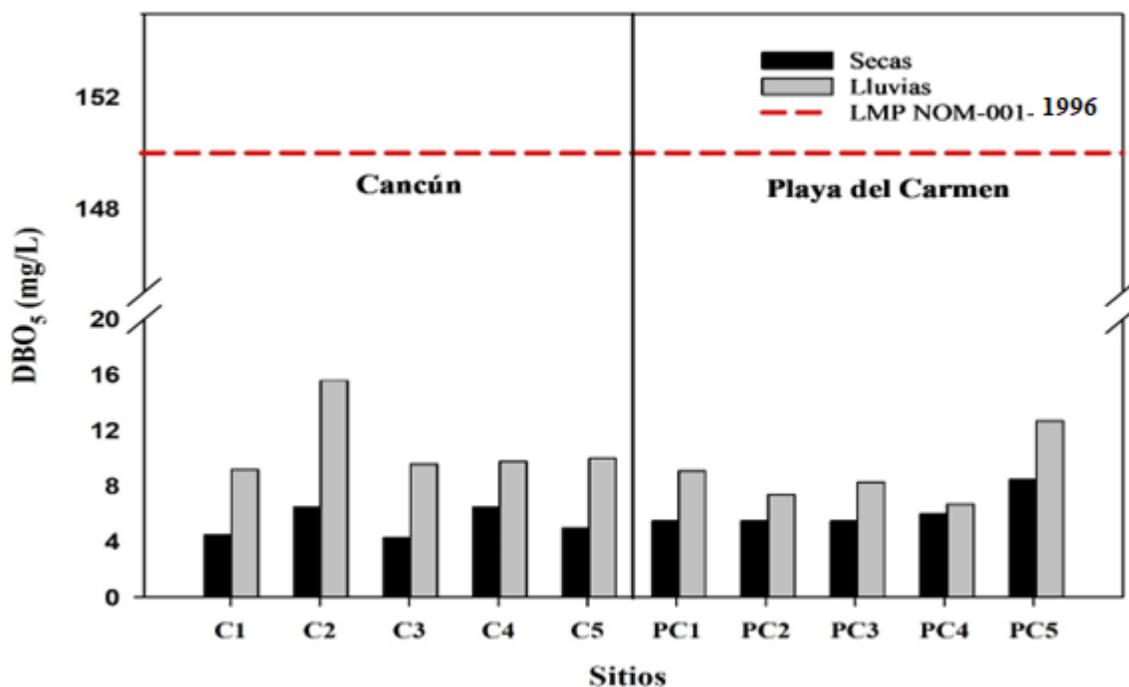


Figura 3.8 Concentración de DBO5 de Cancún y Playa del Carmen en temporada de secas y lluvias 2022. NOM-001-SEMARNAT-2021: No aplica. NOM-001-SEMARNAT1996: LMP 150mg/L.

3.1.11 Demanda Química de Oxígeno

En la temporada de secas el promedio de DQO fue de 17.78 ± 4.26 mg/L (Máx. 46.9 mg/L en C2, Min. 7.18 mg/L en C4), mientras que en la temporada de lluvias el promedio fue de 16.9 ± 6.12 mg/L (Máx. 69 mg/L en C2; Min 4 mg/L en PC2) (Figura 3.9). Los valores no presentaron una distribución normal ($p<0.05$), no existieron diferencias significativas entre la temporada y entre las ciudades de acuerdo con la prueba U de Mann-Whitney ($p>0.05$). Todos los sitios se encontraron por debajo del LMP (84 mg/L) de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-2021.

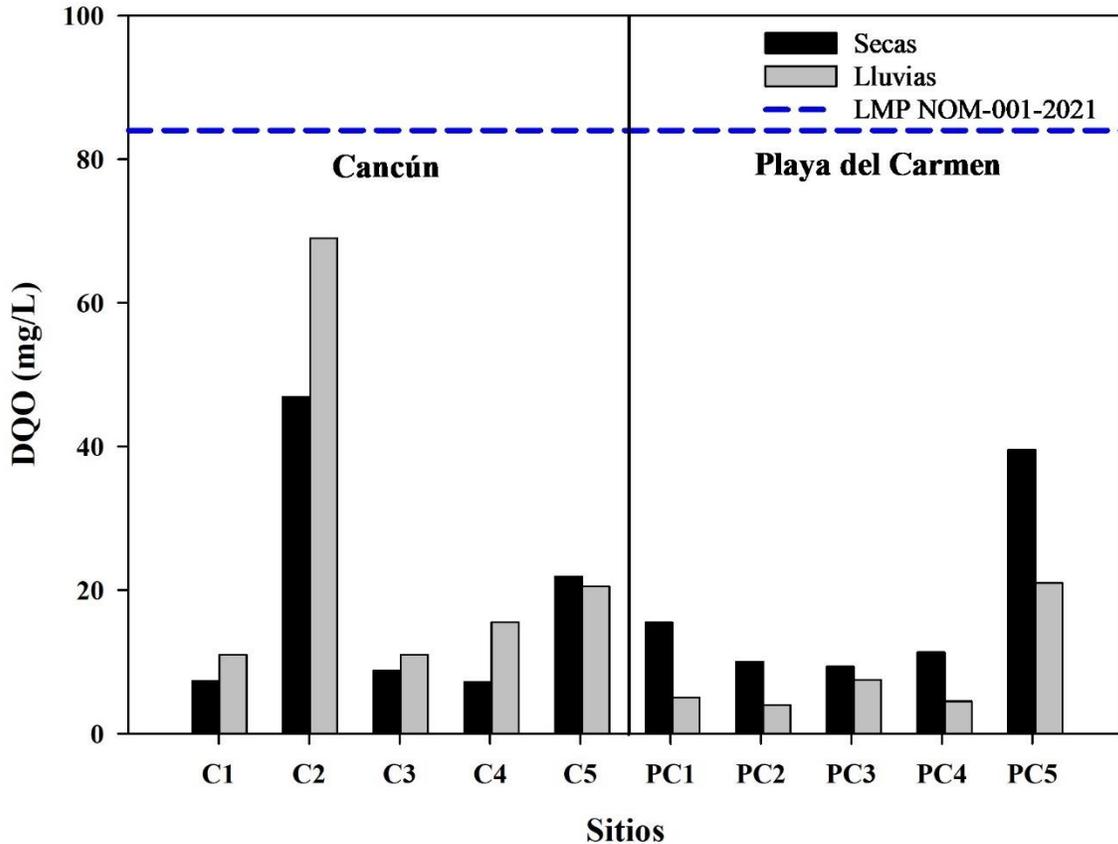


Figura 3.9 Concentración de DQO de Cancún y Playa del Carmen en temporada de secas y lluvias 2022. NOM-001-SEMARNAT-2021: LMP de 84 mg/L.

3.1.12 Carbono orgánico total

En la temporada de secas el promedio de COT fue de 29.49 ± 1.39 mg/L (Máx. 40.00 mg/L en C2, Min. 24.07 mg/L en C1), mientras que en la temporada de lluvias el promedio fue de 16.96 ± 1.71 mg/L (Máx. 31.25 mg/L en C2; Min 11.93 mg/L en PC4) (Figura 3.10). Los valores presentaron una distribución normal ($p > 0.05$), existieron diferencias significativas entre la temporada de secas y lluvias de acuerdo con la prueba t ($p < 0.05$). No existieron diferencias significativas entre el grupo de datos de Cancún y Playa del Carmen ($p > 0.05$). En la temporada de secas todos los sitios superaron el LMP (21 mg/L) de la NOM001-SEMARNAT-2021, en la temporada de lluvias solamente el sitio C2 superó el LMP.

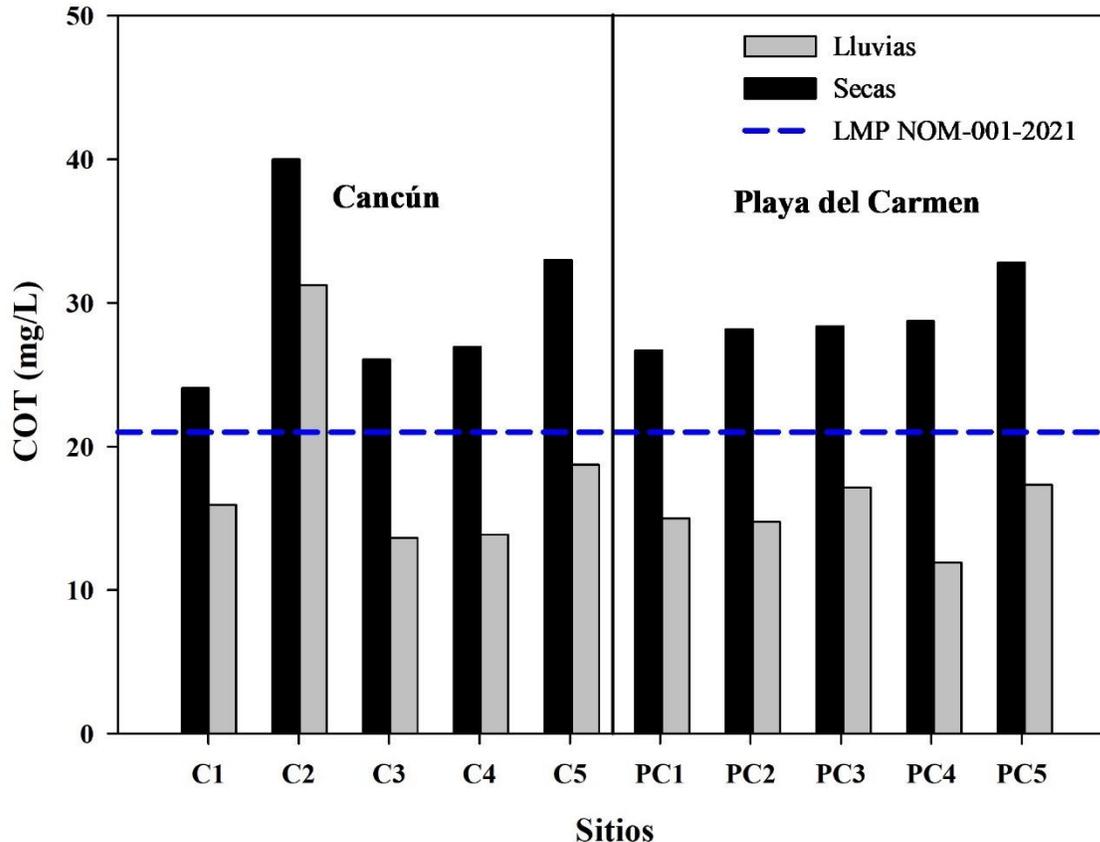


Figura 3.10 Concentración de carbono orgánico total (mg/L) de Cancún y Playa del Carmen en temporada de secas y lluvias 2022. NOM-001-SEMARNAT-2021: LMP 21 mg/L.

3.1.13 Color verdadero

En la temporada de secas el promedio del Coeficiente de Absorción Espectral en la longitud de onda de 436 fue de $1.44 \pm 0.80 \text{ m}^{-1}$ (Máx. 9 m^{-1} en C2, Min. 0.15 m^{-1} en PC4), a 525 nm el promedio fue de 0.91 ± 0.53 (Máx. 5.9 m^{-1} en C2, Min. 0.00 m^{-1} en C3), a 620 nm el promedio fue de 0.61 ± 0.39 (Máx. 4.3 m^{-1} en C2, Min. 0 m^{-1} en PC2). Mientras que en la temporada de lluvias el promedio en la longitud de onda de 436 fue de $0.66 \pm 0.27 \text{ m}^{-1}$ (Máx. 2.35 m^{-1} en C2, Min. 0.00 m^{-1} en C4 y PC1), a 525 nm el promedio fue de $0.27 \pm 0.14 \text{ m}^{-1}$ (Máx. 5.9 m^{-1} en PC5, Min. 0 m^{-1} en C1, C4, PC1, PC2, PC3, PC4), a 620 nm el promedio fue de $0.18 \pm 0.10 \text{ m}^{-1}$ (Máx. 0.85 m^{-1} en PC5, Min. 0 m^{-1} en C1, C4, C5, PC1, PC2, PC3, PC4) (Figura 3.11). Los valores no tuvieron una distribución normal ($p < 0.05$), en ninguna de las longitudes de onda existieron diferencias significativas entre la temporada de secas y lluvias, y entre

ciudades de acuerdo con la prueba U de Mann-Whitney ($p>0.05$). Solamente el sitio C2 superó los LMP en las tres longitudes de onda de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

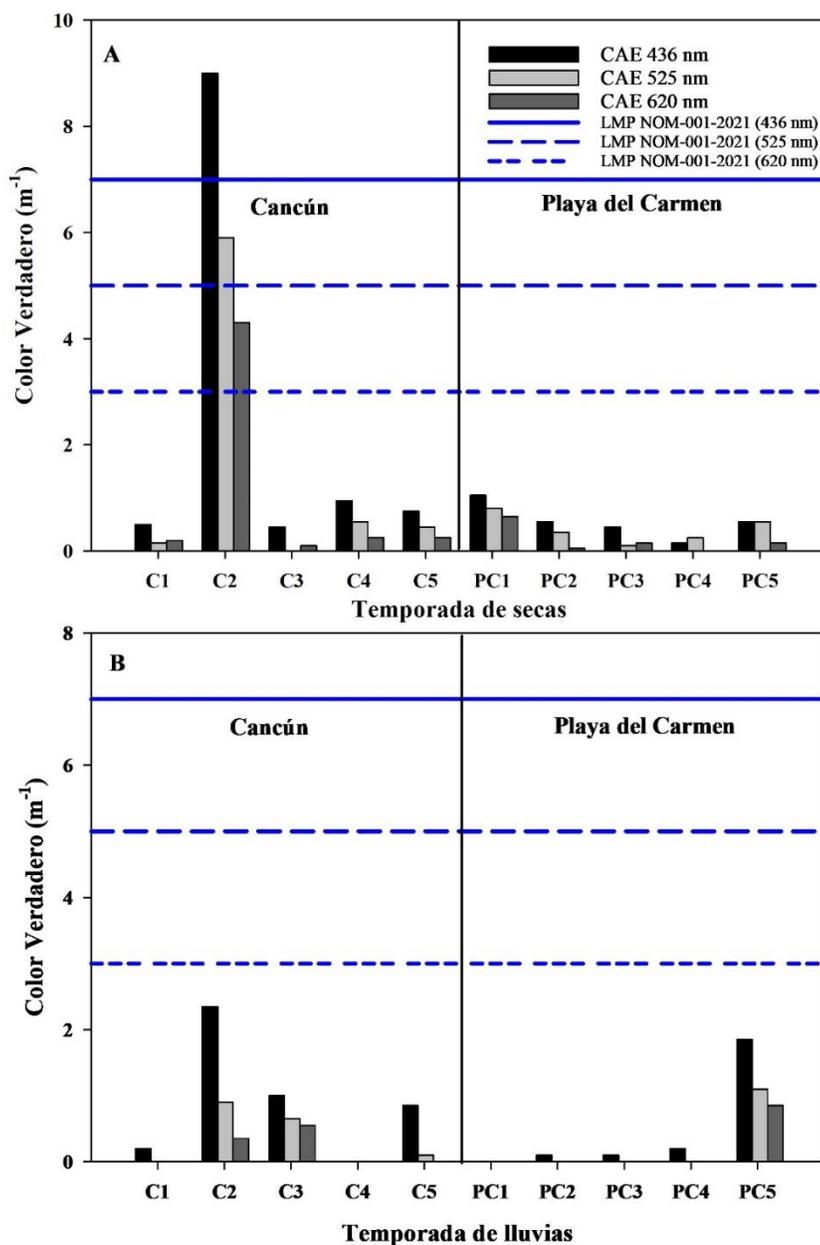


Figura 3.11 Valores de color verdadero (coeficiente de absorción espectral) de Cancún y Playa del Carmen en temporada de secas y lluvias 2022. NOM-001-SEMARNAT-2021: LMP 7.0m⁻¹ a 436 nm, 5.0 m⁻¹ a 525 nm y 3.0m⁻¹ a 620 nm.

3.1.14 Sólidos suspendidos

En la temporada de secas el promedio de sólidos suspendidos (Figura 3.12) fue de 5.237 ± 2.60 mg/L (Max. 29 mg/L en C2, Min. 0.6 en PC2). Mientras que en la temporada de lluvias

el promedio fue de 12.67 ± 7.80 mg (Max. 79 mg/L en C3, Min 0.4 mg/L en C1). Los datos no presentaron una distribución normal ($p < 0.05$), no hubo diferencias significativas entre las temporadas y tampoco entre las ciudades ($p > 0.05$). En la temporada de secas solamente el sitio C2 superó el LMP de la NOM001-SEMARNAT-2021, en la temporada de lluvias el sitio C2 se encontró en el LMP y el sitio C3 superó el LMP, es importante destacar que en el C3 los sólidos suspendidos fueron principalmente carbonatos particulados.

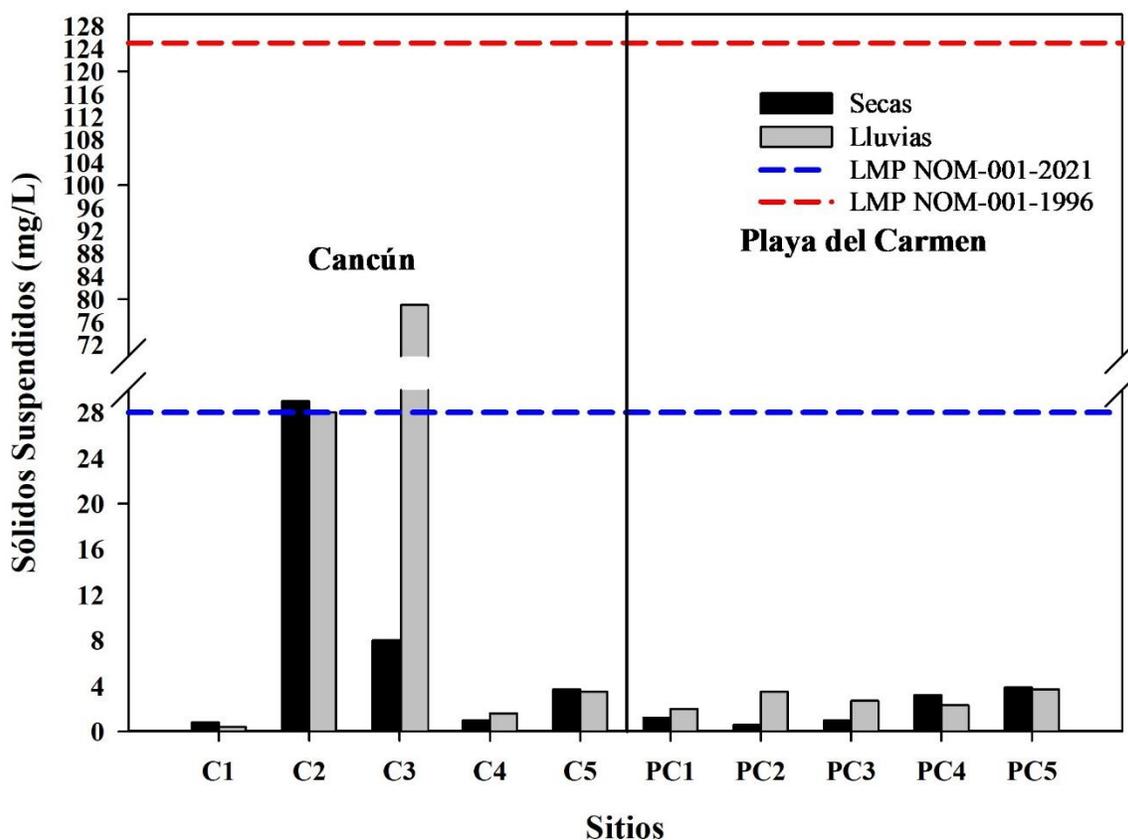


Figura 3.12 Concentración de Sólidos suspendidos totales de Cancún y Playa del Carmen en temporada de secas y lluvias 2022. NOM-001-SEMARNAT-2021: LMP de 28 mg/l. NOM-001-SEMARNAT-1996: LMP de 125 mg/L.

3.1.15 Sólidos sedimentables

En la temporada de secas el promedio de sólidos sedimentables (Figura 3.13) fue de 0.28 ± 0.13 ml/L (Máx. 1.5 ml/L en PC5, Mín. < 0.1 ml/L en PC1, PC2, PC3 y PC4). En la temporada de lluvias el promedio fue de 0.29 ± 0.10 ml/L (Máx. 0.9 ml/L en C2 y C3, Min. < 0.1 ml/L en C1, C5, PC1, PC2). Los datos no tuvieron una distribución normal ($p < 0.05$).

No existieron diferencias significativas entre temporadas y entre ciudades ($p>0.05$). Todos los sitios se encuentran por debajo del LMP (2 ml/L) de la NOM001-SEMARNAT-1996.

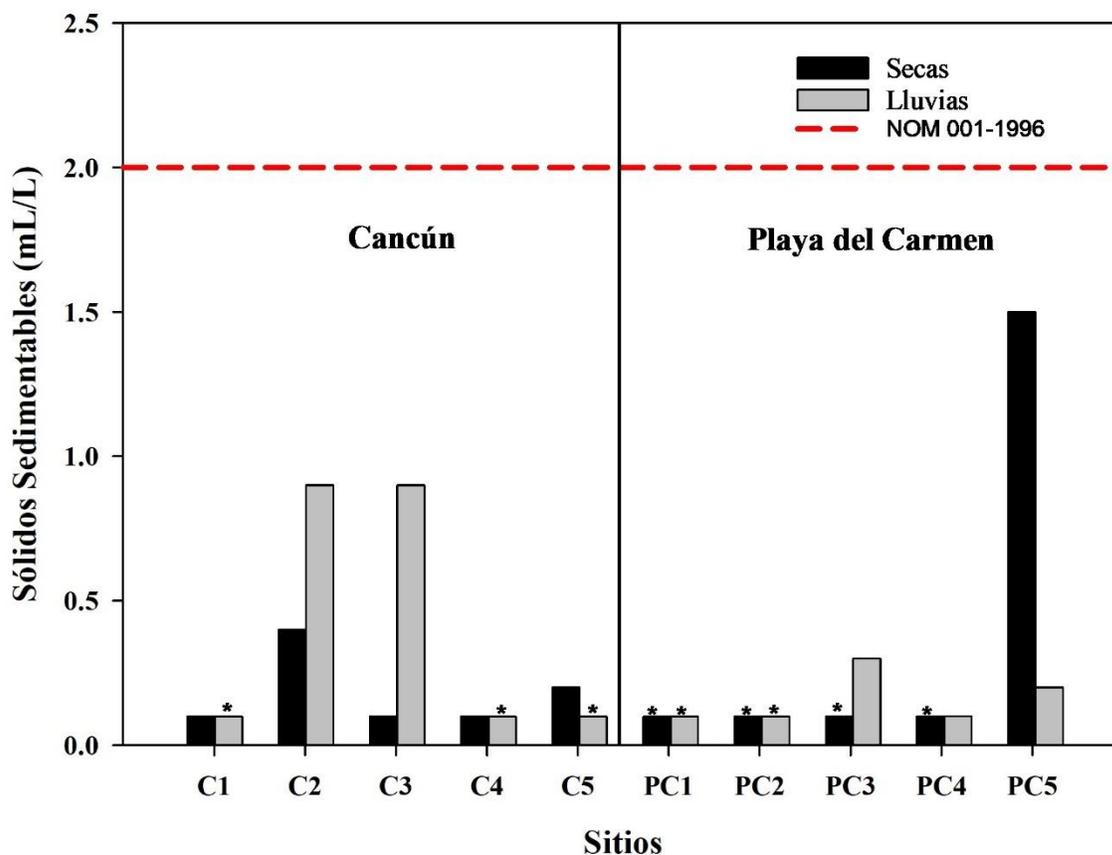


Figura 3.13 Concentración de sólidos sedimentables (ml/L) en temporada de secas y lluvias 2022. LMP 2 ml/l de acuerdo con la NOM001-SEMARNAT-1996.

3.1.16 Grasas y aceites

En la temporada de secas el promedio de grasas y aceites (Figura 3.14) fue de 2.447 ± 0.51 mg/L (Max. 5.62 mg/L en PC1, Min. 0.78 en C5). Mientras que en la temporada de lluvias el promedio fue de 2.40 ± 0.51 mg/L (Max. 5.79 mg/L en C2, Min 0.66 mg/L en PC4). Los datos no tuvieron una distribución normal ($p<0.05$), no hubo diferencias significativas entre las temporadas y tampoco entre las ciudades ($p>0.05$). Todos los sitios se encontraron por debajo de los LMP (21 mg y 25 mg/L) de las NOM-001-SEMARNAT-2021 y NOM-001-SEMARNAT-1996.

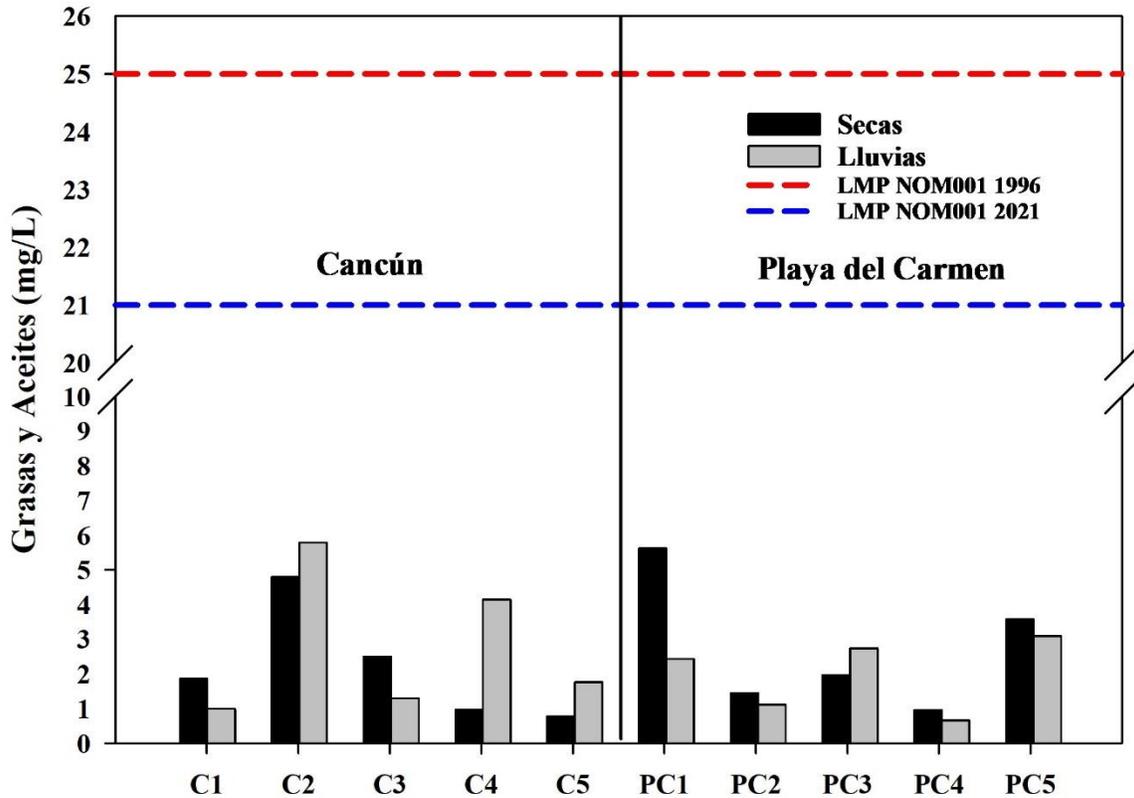


Figura 3.14 Concentración de Grasas y aceites de Cancún y Playa del Carmen en temporada de secas y lluvias 2022. NOM-001-SEMARNAT-2021: LMP de 21 mg/l. NOM-001-SEMARNAT-1996: LMP de 25 mg/L.

3.1.17 Huevos de helmintos

En la temporada de secas el promedio de huevos de helmintos/L fue de 19.72 ± 12.46 (Máx. 129 en C5, Min. 1.6 en C1), en la temporada de lluvias el promedio fue de 4.76 ± 1.13 (Max. 13.6 en C2, Min 1.4 en C1) (Figura 3.15). Los datos no tienen una distribución normal ($p < 0.05$), no existen diferencias significativas entre temporadas y entre ciudades. Todos los sitios presentaron valores por encima de los LMP (5 y 1 huevo de helminto/L) de la NOM-001-SEMARNAT-1996 y la NOM-001-SEMARNAT-2021.

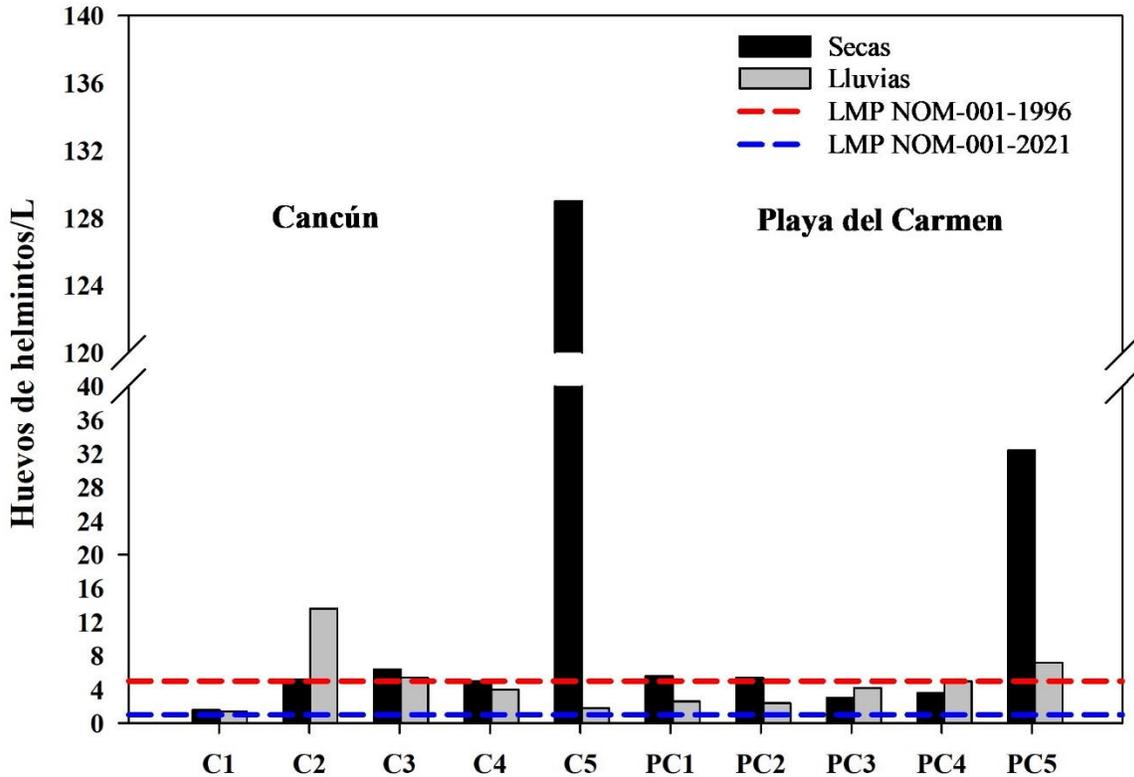


Figura 3.15 Concentración de huevos de helmintos/L de los CADKU de Cancún y Playa del Carmen en temporada de secas y lluvias 2022. NOM-001-SEMARNAT-2021: LMP de 1 huevo/L. NOM-001-SEMARNAT-1996: LMP de 5 huevos/L.

3.1.18 Nitrógeno total

En la temporada de secas el promedio de NT fue de 16.87 ± 2.30 mg/L (Max. 30.35 mg/L en C1, Min. 7.43 mg/L en PC3), mientras que en la temporada de lluvias el promedio fue de 13.93 ± 2.08 mg/L (Máx. 26.96 mg/L en C1, Min. 4.76 mg/L en PC3) (Figura 3.16). Los datos presentaron una distribución normal ($p > 0.05$) y no existieron diferencias significativas entre las temporadas y las ciudades ($p > 0.05$). El sitio C1 y C2 en la temporada de secas superaron el LMP (30 mg/L) de acuerdo con la NOM001-SEMARNAT-2021.

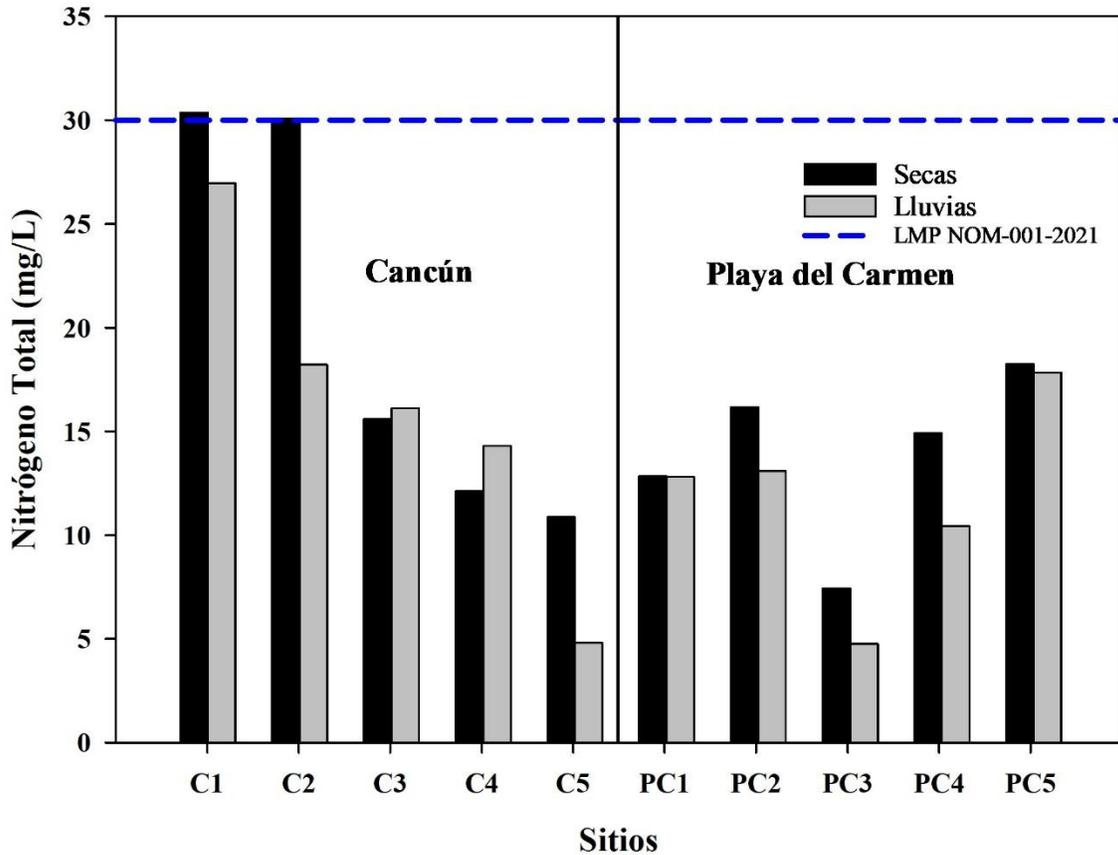


Figura 3.16 Concentración de Nitrógeno Total (mg/L) de los CADKU de Cancún y Playa del Carmen en temporada de secas y lluvias 2022. NOM-001-SEMARNAT-2021: LMP de 30 huevo/L.

3.1.19 Fósforo total

En la temporada de secas el promedio de PT fue de 0.48 ± 0.20 mg/L (Max. 2.14 mg/L en C2, Min. 0.08 mg/L en PC3), mientras que en la temporada de lluvias el promedio fue de 0.66 ± 0.25 mg/L (Max. 2.72 mg/L en C2, Min. 0.09 mg/L en C4) (Figura 3.17). Los datos tuvieron una distribución no normal ($p < 0.05$) y no hubo diferencias significativas entre las temporadas y entre las ciudades ($p > 0.05$). Todos los sitios tuvieron valores inferiores al LMP (10 mg/L) de la NOM001-SEMARNAT-2021.

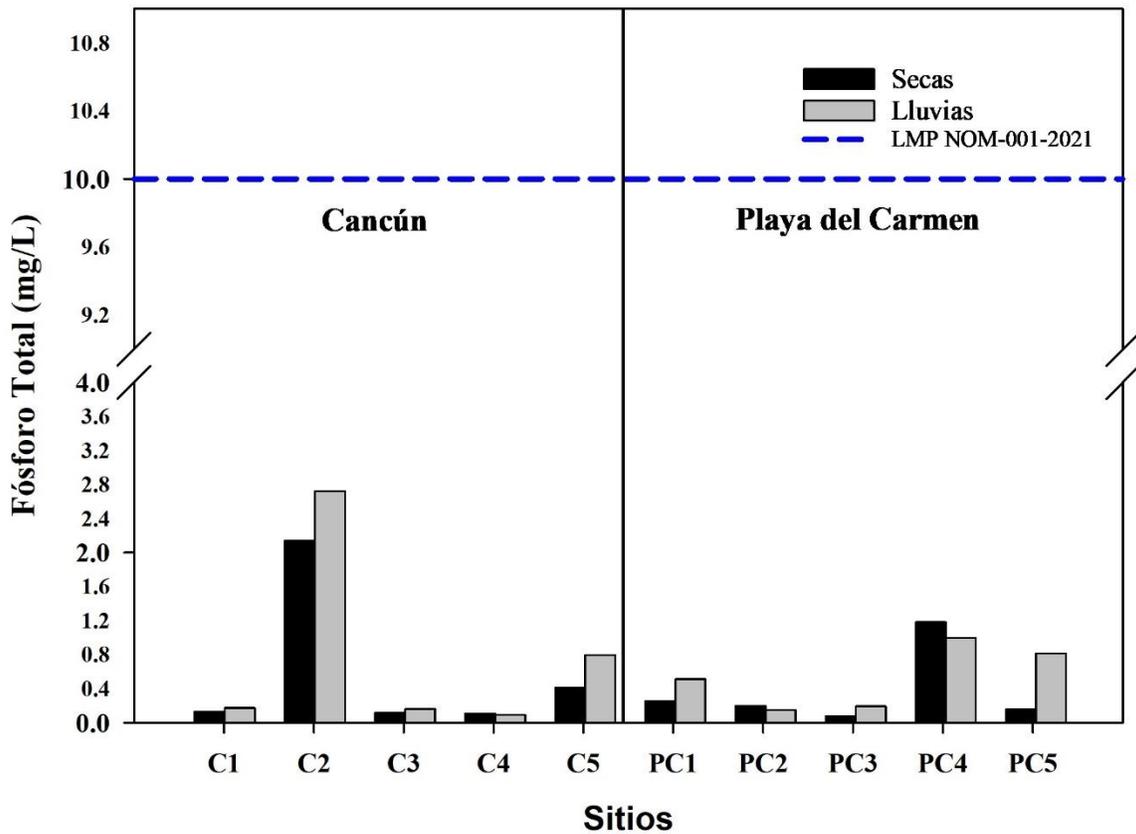


Figura 3.17 Concentración de Fósforo Total (mg/L) de los CADKU de Cancún y Playa del Carmen en temporada de secas y lluvias 2022. NOM-001-SEMARNAT-2021: LMP 10 ml/L.

3.1.20 Toxicidad aguda

En la temporada de secas solamente el sitio PC5 presentó inhibición del crecimiento de la bacteria *Vibrio fischeri* al 75% en comparación del control, valor superior al 10%, lo cual indica toxicidad aguda de acuerdo con la NMX-AA-112-SCFI-2017 (Figura 3.18). Los otros sitios en la temporada de secas y todos los sitios en la temporada de lluvias presentaron hormesis, aumento de la luminiscencia de la bacteria entre el 35 y 84% en relación con la estimulación por dosis bajas de toxicidad.

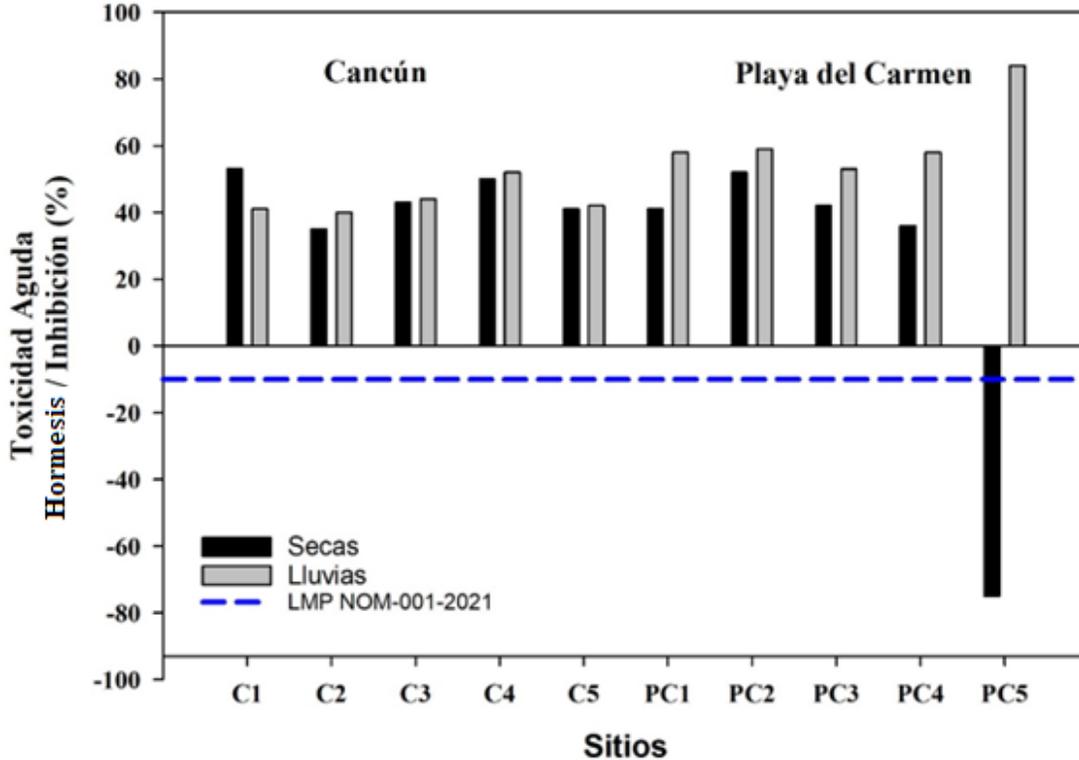


Figura 3.18 Porcentaje de la inhibición de la luminiscencia de la bacteria *Vibrio fischeri* de los CADKU de Cancún y Playa del Carmen en temporada de secas y lluvias 2022. NOM-001-SEMARNAT-2021: Se considera tóxico una inhibición mayor al 10%.

3.2 RESULTADOS MULTIVARIABLES DE CALIDAD DEL AGUA

3.2.1 Correlaciones entre variables.

Las correlaciones (Figura 3.19) positivas y muy altas ($r=0.99$) están vinculadas con la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales. Igualmente existe una correlación fuerte positiva ($r=0.98$) entre las tres longitudes de onda del color verdadero (436, 525 y 620 nm). Se identificaron otras correlaciones significativas ($p<0.05$), con r clasificada como correlaciones positivas, altas y moderadas (Máx. $r=0.70$, Min. $r=0.43$), las cuales están asociadas a parámetros que indican materia orgánica. Además, se identificaron correlaciones negativas entre conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales con el oxígeno disuelto ($r=-0.49$).

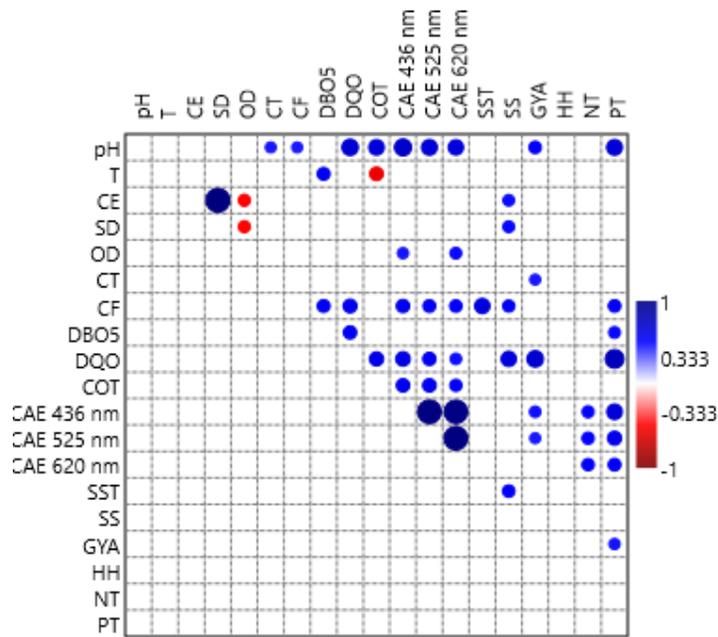


Figura 3.19 Correlación lineal entre los parámetros analizados. Nota: T (temperatura), CE (conductividad eléctrica), SD (sólidos disueltos totales), OD (oxígeno disuelto), CT (coliformes totales), CF (Coliformes fecales), DBO (demanda biológica de oxígeno), DQO (demanda química de oxígeno), CAE (coeficiente de absorción espectral), SST (sólidos suspendidos totales), SS (sólidos suspendidos), GYA (grasas y aceites, HH (huevo de helmintos), NT (nitrógeno total), PT (fósforo total).

1.3.2. Dendrogramas de agrupamiento

La formación de grupos con base en la medida de similitud obtenida con el índice de Bray-Curtis mediante ligamiento simple (Figura 3.20) y considerando todos los parámetros, no identificó grupos exclusivos entre temporadas (secas/lluvias) o entre sitios (Cancún/Playa del Carmen). Se visualizan semejanzas entre cenotes de distintos sitios (p. ej. PC4 lluvias con C4 lluvias) y entre cenotes de un mismo sitio, pero de diferentes temporadas (p. ej. PC4 secas con PC2 lluvias). Los sitios con menor similitud (0.80 a 0.85) fueron PC5 lluvias, PC5 secas y PC2 secas). Posteriormente se identifica la agrupación de tres grupos, donde se excluye el sitio PC1 secas. Los sitios que conservaron la mayor similitud consigo mismo tanto en temporadas de secas como de lluvias fue C2 (0.97), C1 (0.96) y PC3 (0.95).

Al considerar solamente los parámetros para el ICA, se identifica que igualmente no existieron agrupaciones específicas entre sitios o temporadas. Los sitios C2 y PC3 conservaron la mayor similitud entre ellos mismos en ambas temporadas. Aumentó la similitud el sitio PC5 con otros sitios, por lo que se entiende que los parámetros sobre minerales (CE y SDT) son por lo cual se denota las mayores diferencias de la Figura 3.20a.

En la Figura 3.20b forman 4 grupos principales conformados por 4 o más sitios con una similitud entre 0.74 y 0.90. Se identificaron dos grupos conformado por C3, PC5, C2 y C5 en temporada de secas (recuadros verdes), quienes concuerdan con ser los sitios con mayores concentraciones de coliformes fecales, por lo cual la agrupación está presentada principalmente por contaminación fecal.

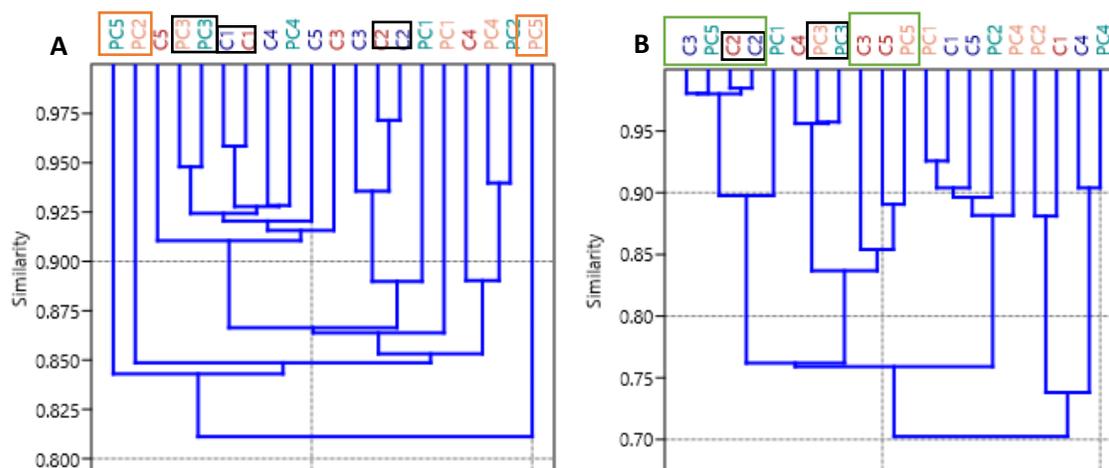


Figura 3.20 Cluster de Bray-Curtis. A) Conserando todos los parámetros. B) Considerando solamente los parámetros incluidos en el ICA (excepto los no continuos). Nota: el recuadro rojo indica los sitios más diferentes a todos los demás, los recuadros negros indican los sitios que presentan la mayor similitud consigo mismo en ambas temporadas, los recuadros verdes están vinculados a agrupaciones por contaminación fecal.

El análisis NMDA (Figura 3.21) considerando todos los sitios, no se identificó agrupaciones muy cercanas, pero si el alejamiento del PC5 y PC2. Sin embargo, al considerar solamente los parámetros del ICA, se identifica el agrupamiento C1 y PC2 en temporada de secas, los cuales los hemos considerado como oligotróficos por sus aguas claras.

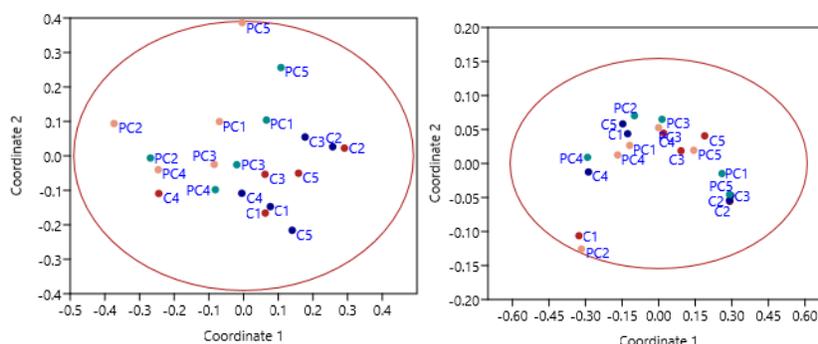


Figura 3.21 nMDA. A) Conserando todos los parámetros. B) Considerando solamente los parámetros incluidos en el ICA (excepto los no continuos). Nota: puntos rojos son de temporada de secas, y los azules de lluvias.

3.2.3 ANOSIM Y SIMPER

El análisis de ANOSIM de una vía de acuerdo con el índice de Bray-Curtis indicó que no existieron diferencias significativas entre las temporadas de secas y lluvias. Sin embargo, si existió diferencias significativas ($p > 0.05$) entre el grupo de ciudades (Cancún y Playa del Carmen). El análisis de SIMPER (Tabla 3.2) indica que los parámetros que más contribuyen a las diferencias (98%) son la Conductividad Eléctrica, Coliformes Fecales, Coliformes Totales y Sólidos Disueltos Totales. Al considerar en el SIMPER (Tabla 3.3) solamente los parámetros de ICA, el 90% es contribuido por Coliformes Fecales (*E. coli*), y no existieron diferencias significativas entre temporadas y tampoco entre sitios.

Tabla 3.2. SIMPER todas las variables.

Variable	Contribución %	Acumulativo %	Promedio (Secas)	Promedio (Lluvias)
CE	29.93	29.93	2.05E03	1.69E03
CF	29.86	59.79	745	1.09E03
CT	22.78	82.58	1.86E03	2.22E03
SD	14.95	97.53	1.02E03	842
HH	0.5269	98.06	19.7	4.76
DQO	0.4656	98.52	17.8	16.9
COT	0.4211	98.94	29.5	17
SST	0.3965	99.34	5.24	12.7
NT	0.2568	99.6	16.9	13.9
DBO5	0.1311	99.73	5.78	9.84
GYA	0.05402	99.78	2.45	2.4
OD	0.04665	99.83	2.04	2.22
CAE 436 nm	0.04435	99.87	1.44	0.665
T	0.03953	99.91	25.5	26.6
CAE 525 nm	0.02848	99.94	0.91	0.275
PT	0.02128	99.96	0.478	0.661
CAE 620 nm	0.01981	99.98	0.61	0.175
pH	0.00937	99.99	7.24	7.1
SS	0.008215	100	0.28	0.29

Tabla 3.3. SIMPER variables ICA

Variable	Contribución %	Acumulado %	Promedio Secas	Promedio Lluvias
CF	90.98	90.98	745	1.09E03
COT	2.047	93.03	29.5	17
HH	1.618	94.65	19.7	4.76
DQO	1.598	96.25	17.8	16.9
NT	1.34	97.59	16.9	13.9
SST	0.9712	98.56	5.24	12.7

DBO5	0.568	99.13	5.78	9.84
GYA	0.2559	99.38	2.45	2.4
T	0.2251	99.61	25.5	26.6
CAE 436 nm	0.129	99.74	1.44	0.665
CAE 525 nm	0.08654	99.82	0.91	0.275
PT	0.08039	99.9	0.478	0.661
CAE 620 nm	0.05694	99.96	0.61	0.175
pH	0.03935	100	7.24	7.1

3.3 RESULTADOS ICA

En temporada de secas con el ICA-NOM001-1996, los cenotes con calificación de excelente fueron C1, PC2, PC3 y PC4; en el ICA-NOM001-2021 solamente C1 tuvo calificación excelente. Mientras que los más contaminados (pobres y extremadamente pobres) en el ICA-NOM001-1996 fueron C5 y PC5; en el ICA-NOM001-2021 fueron C2, C5 y PC5. En temporada de lluvias con el ICA-NOM001-1996 los cenotes con calificación de excelente fueron C1, C4, C5, PC2, PC3 y PC4; en el ICA-NOM001-2021 fueron C1 y C5. Mientras que con el ICA-NOM001-1996 en temporada de lluvias los cenotes no alcanzaron la categoría de pobre. Sin embargo, con el ICA-NOM001-2021 los cenotes pobres y extremadamente pobres en temporada de lluvias fueron C2, C3 y PC5. Se observa que, si existieron diferencias significativas entre las normativas, el ICA de 1996 y el de 2021 de acuerdo con el análisis de Mann-Whitney ($p < 0.05$). En la Tabla 3.4 se indica los valores de los subíndices y el valor del ICA 2021 y 1996 para cada sitio en las dos temporadas.

Tabla 3.4. Subíndices y valor del ICA

Parámetro	C1	C2	C3	C4	C5	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
	SI _i Secas NOM 001-SEMARNAT-1996									
T	1.76	1.71	1.71	1.80	1.78	1.70	1.61	1.71	1.68	1.75
GYA	0.80	2.08	1.08	0.42	0.34	2.43	0.62	0.85	0.42	1.55
SST	0.03	1.25	0.35	0.04	0.16	0.05	0.03	0.04	0.14	0.17
HH	8.65	28.11	34.59	27.03	697.30	30.27	29.19	16.22	19.46	175.14
CF	1.24	65.39	23.42	16.57	35.13	7.71	1.09	14.80	5.67	65.39
SS	0.27	1.08	0.27	0.27	0.54	0.27	0.27	0.27	0.27	4.05
MF	5.41	5.41	5.41	5.41	5.41	5.41	5.41	5.41	5.41	5.41
DBO ₅	0.49	0.70	0.46	0.70	0.54	0.59	0.59	0.59	0.65	0.92
ΣSI _i	18.64	105.73	67.29	52.24	741.19	48.43	38.81	39.88	33.69	254.37
ICA	E	R	B	B	EP	E	E	E	E	P
	SI _i Secas NOM-001-SEMARNAT-2021									
T	0.84	0.82	0.82	0.86	0.85	0.82	0.78	0.82	0.81	0.84
GYA	0.40	1.04	0.54	0.21	0.17	1.22	0.31	0.42	0.21	0.77
SST	0.06	2.35	0.65	0.08	0.30	0.10	0.05	0.08	0.26	0.31
DQO	0.79	5.08	0.96	0.78	2.37	1.67	1.08	1.01	1.23	4.28
COT	7.81	12.99	8.46	8.74	10.71	8.67	9.15	9.21	9.33	10.66

NT	6.90	6.84	3.55	2.76	2.47	2.92	3.68	1.69	3.39	4.15
PT	0.09	1.46	0.08	0.07	0.28	0.17	0.13	0.06	0.81	0.11
HH	18.18	59.09	72.73	56.82	1465.91	63.64	61.36	34.09	40.91	368.18
CF	2.60	137.48	49.23	34.84	73.85	16.20	2.30	31.11	11.92	137.48
pH	0.90	0.99	0.92	0.89	0.95	0.93	0.87	0.89	0.91	0.89
CAE 436	0.65	11.69	0.58	1.23	0.97	1.36	0.71	0.58	0.19	0.71
CAE 525	0.27	10.73	0.00	1.00	0.82	1.45	0.64	0.18	0.45	1.00
CAE620	0.61	13.03	0.30	0.76	0.76	1.97	0.15	0.45	0.00	0.45
T A	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.36
ΣSli	40.12	263.58	138.82	109.04	1560.42	101.12	81.21	80.60	70.41	541.20
ICA	E	P	R	R	EP	R	B	B	B	EP
Parámetro	SI _i Lluvias NOM 001-SEMARNAT-1996									
T	1.84	1.78	1.82	1.83	1.80	1.78	1.80	1.74	1.78	1.79
GYA	0.43	2.50	0.56	1.79	0.76	1.05	0.48	1.18	0.29	1.34
SST	0.02	1.21	3.42	0.07	0.15	0.09	0.15	0.12	0.10	0.16
HH	7.57	73.51	29.19	21.62	9.73	14.05	12.97	22.70	27.03	38.92
CF	7.45	65.39	65.39	2.45	6.71	53.68	8.87	15.66	2.66	65.39
SS	0.27	2.43	2.43	0.27	0.27	0.27	0.27	0.81	0.27	0.54
MF	5.41	5.41	5.41	5.41	5.41	5.41	5.41	5.41	5.41	5.41
DBO ₅	0.99	1.69	1.04	1.06	1.08	0.98	0.80	0.90	0.72	1.37
ΣSli	23.97	153.93	109.26	34.50	25.91	77.31	30.74	48.51	38.25	114.92
ICA	E	R	R	E	E	B	E	E	E	R
Parámetro	SI _i Secas NOM-001-SEMARNAT-2021									
T	0.89	0.86	0.87	0.88	0.87	0.85	0.86	0.83	0.85	0.86
GYA	0.21	1.25	0.28	0.90	0.38	0.53	0.24	0.59	0.14	0.67
SST	0.03	2.27	6.41	0.13	0.28	0.16	0.28	0.22	0.19	0.30
DQO	1.19	7.47	1.19	1.68	2.22	0.54	0.43	0.81	0.49	2.27
COT	5.18	10.15	4.43	4.50	6.09	4.87	4.80	5.56	3.87	5.63
NT	6.13	4.14	3.66	3.25	1.09	2.91	2.98	1.08	2.37	4.05
PT	0.12	1.86	0.11	0.06	0.54	0.35	0.10	0.13	0.68	0.56
HH	15.91	154.55	61.36	45.45	20.45	29.55	27.27	47.73	56.82	81.82
CF	15.65	137.48	137.48	5.16	14.10	112.86	18.65	32.92	5.60	137.48
pH	0.89	0.95	0.88	0.89	0.94	0.90	0.85	0.89	0.87	0.90
CAE 436	0.26	3.05	1.30	0.00	1.10	0.00	0.13	0.13	0.26	2.40
CAE 525	0.00	1.64	1.18	0.00	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	2.00
CAE620	0.00	1.06	1.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.58
T A	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.36
ΣSli	46.46	326.72	220.83	62.90	48.25	153.52	56.60	90.90	72.14	252.88
ICA	E	EP	P	B	E	R	B	B	B	P

Nota: E=Excelente, B=Bueno, R=Regular, P=Pobreza, EP=Extremadamente Pobre

La tendencia es similar (se identifican los cenotes más y menos contaminados) en los ICA (1996 y 2021), sin embargo, en el ICA del 2021 se reduce la calidad del agua, aumentando a categorías de peor calidad. Por ejemplo, en temporada de secas los cenotes que se encontraban como excelentes en el ICA-NOM-1996 cambiaron a buenos o a regulares (a excepción del C1 que se mantuvo como excelente). Igualmente, en la temporada de lluvias, los cenotes que estaban en la categoría de regulares aumentaron a pobres o extremadamente pobre. En la Figura 3.22 se representa con gráficas los resultados obtenidos con el ICA 2021

y el de 1996. Se identifica que Cancún alcanza concentraciones de contaminación más altas que Playa del Carmen.

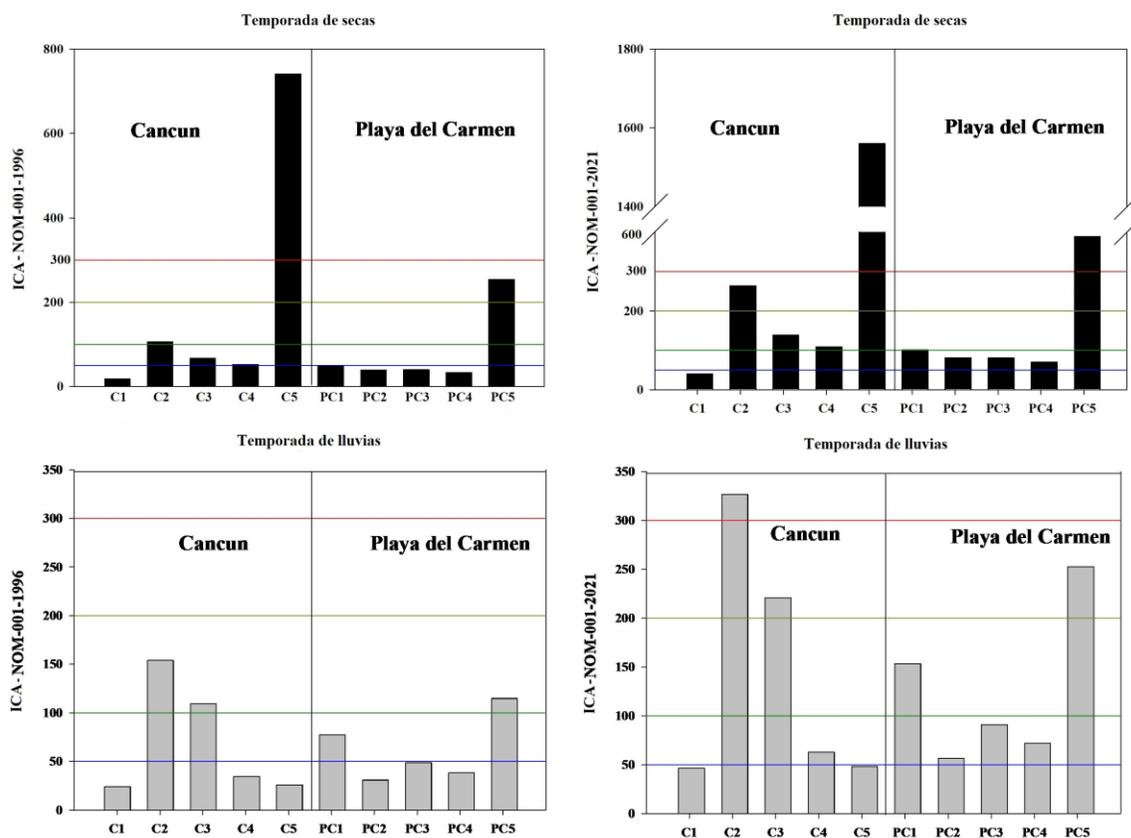


Figura 3.22 ICA en temporada de secas y lluvias en Cancún y Playa del Carmen. Nota. Excelente <50 (línea azul), Bueno 50<100 (línea verde), Regular 100<200 (línea amarilla), Pobre 200<300 (línea roja), Extremadamente pobre >300 (por encima de la línea roja).

En la Figura 3.22 se identifica una tendencia entre el ICA 1996 y el 2021 relacionada con el uso de los mismos datos y misma metodología. Para representar la relación se aplicó un análisis de correlación lineal, obteniendo una correlación significativa ($p < 0.001$) con R^2 de 0.96 (Figura 3.23). Al eliminar el dato más extremo se obtiene una R^2 de 0.71 y la correlación sigue siendo significativa ($p < 0.001$).

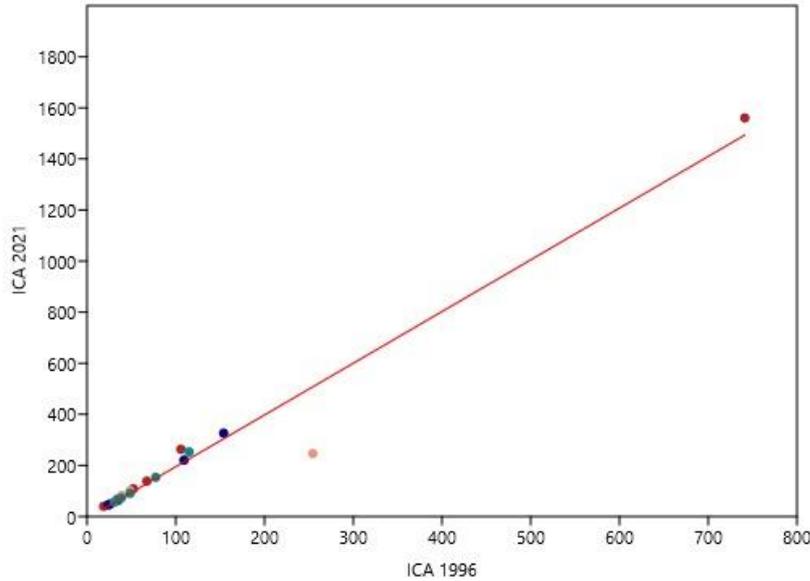


Figura 3.23 Correlación entre el ICA 1996 y 2021.

3.4 DISCUSIÓN

3.4.1 Cuantificación de parámetros físicos, químicos y biológicos de calidad del agua en CADKU de Cancún y Playa del Carmen

A) Parámetros físicos

Temperatura

Los valores de temperatura (23.9-27.3°C) de este estudio se encontraron dentro de los valores (20-35 °C) reportados por otros autores (Rosiles-González *et al*, 2017; Hernández Flores, 2018; Cejudo, 2018, Herrera-Silveira, 1999; de la Lanza *et al*, 2006) para los cuerpos de agua de la zona. Hubo diferencias significativas entre ciudades en los valores de temperatura, aunque su rango no superó una unidad, por lo tanto, consideramos que no es relevante ya que estas pueden estar asociadas a la hora en la que se realizó el muestreo dentro de la variación climática local. En Playa del Carmen la colecta se realizó en las primeras horas del día (entre las 5:30 y 9 horas) y en Cancún (entre las 10 y 12:30 horas). Por lo tanto, las diferencias pueden deberse al calentamiento del agua superficial asociada a las diferencias de irradiancia en cada periodo de muestreo. Igualmente, se detectaron diferencias significativas en la temperatura entre las temporadas anuales, las cuales están asociadas a la mayor cantidad de energía solar que se experimentan durante la temporada de lluvias (verano) en la región (CONAGUA, 2021).

Los valores de temperatura se encontraron dentro de los LMP de la NOM-001-SERMARNAT-2021 y dentro de lo recomendado (15-35°C) por CONAGUA (2015) para evitar afectaciones en los procesos químicos y biológicos en los sistemas acuáticos. Este rango de temperatura se puede relacionar con la presencia y abundancia de bacterias en los distintos cenotes muestreados ya que es óptimo para las bacterias mesófilas de aguas subterráneas que se encuentran en un rango de entre los 20 y 30°C, lo que les permite un adecuado crecimiento, incluyendo las de origen fecal (Chapelle, 2001).

Conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales

Las principales fuentes de iones disueltos y salinidad presentes en el acuífero de la península de Yucatán están vinculados a la intrusión salina marina, la disolución de la roca calcárea y la contaminación de origen antropogénico (Aguilar-Flores, 2020; Sánchez *et al*, 2016). Los valores de la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales (indicadores de iones) cuantificados en este estudio fueron más altos en los cenotes de Playa del Carmen que en los cenotes de Cancún. Consideramos que esto es debido a los cenotes de Playa del Carmen se encuentran más cerca de la costa del Mar Caribe, por lo que algunos valores pudiesen presentar mezcla del acuífero con agua salada. Herrera-Silveira (1999) y De la Lanza *et al* (2006) han indicado en cenotes de Playa del Carmen concentraciones de conductividad eléctrica entre los 500 y 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, los cenotes costeros incluso llegan a valores cercanos a 30,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

El sitio con mayor conductividad eléctrica fue PC5 en Playa del Carmen en temporada de secas (5670 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y en temporada de lluvias (3720 $\mu\text{S}/\text{cm}$), este sitio es el más cercano a la costa, a 1.7 km. Beddows *et al*. (2007) indican que hay un rápido incremento de la CE a 1 km de la costa, y que entre 1 y 4 km (tierra adentro) es persistente una mezcla turbulenta con el agua salina, después de 4 km la mezcla es más limitada. El acuífero de la península de Yucatán es un lente de agua dulce sobrepuesta al agua salada debido a la diferencia de densidad y presión, este espesor varía en relación con la cercanía con la costa. Quintana Roo, al ser un Estado costero presenta intrusión salina de forma natural (Graniel *et al.*, 2004; Aguilar-Flores, 2020). En la temporada de secas es más recurrente la intrusión salina debido al adelgazamiento de la capa de agua dulce y la presión del flujo del mar hacía tierra adentro; además, en la temporada de lluvias, los sólidos disueltos totales disminuyen por efecto de

dilución con la precipitación pluvial (Morales-Ojeda *et al.* 2021; Alcocer *et al.*, 1998). Por esto, la conductividad eléctrica en el sitio PC5 fue más alta en las temporadas de secas. Por otra parte, no hay que descartar que exista contaminación antropogénica, principalmente sales de diversos orígenes (por ejemplo, derivados de sodio proveniente de detergentes, jabones, productos de limpieza y lixiviados de alimentos de basureros clandestinos), que estén afectando la CE del sitio PC5.

Color verdadero

El sitio C2 en la temporada de secas fue el único sitio que superó los LMP de la NOM-001-SEMARNAT-2021. En los cuerpos de aguas naturales la presencia de color está vinculada principalmente con material orgánico en degradación o húmico (PROY-NMX-AA-017-SCFI-2020). El sitio C2 presentó turbidez durante la colecta, además de se observaron los valores más altos en DQO, COT, coliformes fecales y sólidos suspendidos. Consideramos que el color verdadero en el sitio C2 puede deberse a los residuos producidos por las bacterias durante la degradación de la materia orgánica. No se identificó a nivel macroscópico una coloración dominante en el cuerpo de agua, la cual era turbia, sin embargo, ya que la concentración del coeficiente de absorción espectral fue alta en las tres longitudes de onda no hay que descartar la posibilidad de contaminación puntual por aguas residuales domésticas con alto contenido de residuos de jabones o detergentes y otros productos con colorantes.

Materia flotante

Todos los sitios presentaron materia flotante, clasificada como residuos sólidos urbanos, principalmente plásticos, aluminio y poliestireno expandido (unicel). Además de ser un problema estético y que se relaciona de manera directa con la gestión de los residuos urbanos de un asentamiento humano, esta problemática es reconocida por los departamentos de Ecología de ambos municipios y otras asociaciones civiles, por lo cual se lleva a cabo de manera permanente el programa de saneamiento de cenotes y humedales de agua dulce, lo que ha tomado gran importancia porque los residuos plásticos se convierten en microplásticos, contaminantes emergentes presentes en el agua subterránea de la península de Yucatán y puede ocasionar afectaciones a los organismos acuáticos (Mendoza-Olea *et al.* 2022). Los microplásticos pueden ocasionar obstrucción intestinal, bioacumulación, alteraciones hormonales, inhibición de crecimiento y retraso de madurez en invertebrados,

peces, mamíferos acuáticos y aves (Xiong-Xiong *et al.* 2018). Además, de acuerdo con Hoz-Zavala y Torres-Rivero (2018) el departamento de Ecología de Benito Juárez ha reportado en los cenotes “llantas, botellas de PET y vidrio, bolsas plásticas, residuos de refrigerados y animales domésticos muertos”, lo cual presenta un riesgo para el ecosistema acuático ya que pueden ser incorporados en los tejidos de los organismos nativos.

Sólidos suspendidos totales

Solamente los sitios C2 y C3 superaron el LMP (28 mg/L). El sitio C2 presentó sólidos suspendidos totales en las dos temporadas de muestreo, junto con turbidez y partículas de materia orgánica flotando y la presencia de un sedimento fino que se resuspendió fácilmente, lo que se pudo relacionar con guano de murciélago y desechos de materia orgánica debido a que la zona está cercana a escurrimientos urbanos del tipo doméstico. Los SST del sitio C3 en la temporada de lluvias estuvieron constituidos principalmente por carbonatos particulados, lo cual es común en los cuerpos de agua someros de tipo caverna somera (30 cm de agua aproximadamente) debido al lavado y arrastre continental. Leal-Bautista *et al.* (2011) reportaron concentraciones de entre 8 y 182 mg/L de sólidos suspendidos en pozos y cenotes de la Riviera Maya. Considerando las características del sitio C2 y la normativa NOM-001-SEMARNAT-2021 consideramos que el valor >28 mg/l indica contaminación por presiones antropogénicas.

Sólidos sedimentables

Los valores de sólidos sedimentables fueron inferiores a los 0.5 ml/l, con excepción de los sitios C2 y C3 en temporada de lluvias (valores cercanos a 1 ml/L) y de PC5 en temporada de secas (1.5 mg/L). Los valores de sólidos sedimentables de C2 y C3 concuerdan con los valores de sólidos suspendidos. Sin embargo, consideramos que solamente los sitios C2 y PC5 presentan una grave problemática de contaminación por materia orgánica particulada asociada a desechos domésticos y fauna asociada.

B) Parámetros químicos

Oxígeno disuelto

Todos los sitios de este estudio tuvieron concentraciones de oxígeno disuelto menores al LMP para la protección de la vida acuática (5 mg/L de O₂) de acuerdo con la CE-CCA-

001/89. Los datos obtenidos son similares a lo indicado por Alcocer *et al* (1998), Herrera-Silveira (1999) y Cejudo-Espinosa *et al.* (2021). El oxígeno disuelto en los cenotes de la península de Yucatán tiende a ser bajo por diversos motivos: en primer lugar, los cenotes cerrados o semicerrados tienen poco contacto con el aire de la atmósfera, por lo tanto, el intercambio y la disolución de oxígeno en el agua es limitado y también genera que la penetración de luz a través de la columna de agua sea limitada lo que disminuye el crecimiento y la actividad de organismos fotosintéticos, quienes son los principales productores de oxígeno. Por otra parte, su baja concentración también se relaciona con la abundancia de material orgánico presente y la respiración microbiana que consume el poco oxígeno disuelto disponible para su degradación (Alcocer *et al.*, 1998).

Sin embargo, consideramos atípicas las condiciones anóxicas en muestras superficiales, como fue en el caso del cenote PC5 en temporada de secas, lo que pudo estar relacionado con que el sitio presentó valores de NT de 18.25 mg/L de los cuales el amonio representó el 80% debido a las condiciones anóxicas. Asimismo, los sólidos sedimentables alcanzaron 1.5 mg/L y el DQO y DBO5 llegaron a 39.51 mg/L y 8.5 mg/l, respectivamente. Por otro lado, la conductividad eléctrica llegó a 5670 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y las coliformes totales y los Enterococos fueron ≥ 2419 NMP/100 mL. Lo anterior hace suponer que las condiciones anóxicas están relacionadas con contaminación por materia orgánica de origen fecal asociadas a escurrimientos clandestinos de agua residuales urbanas en este punto de muestreo, la cual promueven que disminuya la concentración de oxígeno disuelto en el agua al aumentar la tasa de consumo de oxígeno microbiano.

pH

Los valores de pH (6.92-7.84) de este estudio se encontraron dentro de los valores reportados por otros autores (pH de 6.9-8.5 en Rosiles-González *et al*, 2017; Hernández Flores, 2018; Cejudo, 2018, Herrera-Silveira, 1999; de la Lanza *et al*, 2006) para los cuerpos de agua de la zona. Los valores de pH se encontraron dentro de los LMP de la NOM-001-SERMARNAT-2021, NOM-127-SSA1-1994 y también, dentro de los valores recomendados por CONAGUA (2015) para actividades de nado. Estos valores están dados por los tipos de iones disueltos vinculados a la disolución de material carbonatado de la zona y la generación de ácido carbónico por reacciones de disolución con una capacidad de amortiguamiento alta que

genera poca variabilidad en sus valores entre temporadas de lluvia y secas e incluso en zonas donde ocurren aportes antropogénicos de aguas residuales (Estrada-Medina *et al.* 2019).

DBO₅

Todos los sitios presentaron valores inferiores al LMP (150 mg/L) de la NOM-001-SEMARNART-1996, sin embargo, los valores obtenidos en este estudio (DBO₅ 4.3-15.6 mg/L) fueron superiores a los reportados por Leal-Bautista *et al.* (2019) en pozos de Cancún y De la Lanza *et al.* (2006) en cenotes de Playa del Carmen (0.7-7.16 mg/L). Los valores fueron cercanos al rango de variación de DBO₅ de 1.65-18.67 mg/L encontrados por Facultad de Ingeniería de la UADY en 2008 en pozos de agua dulce ubicados en el ex basurero de Mérida (CONAGUA *et al.* 2022). Los sitios que presentaron mayor concentración de DBO₅ fueron C2 y PC5, en temporada de lluvias, los cuales presentaron contaminación orgánica y fecal de acuerdo con los valores de DQO y coliformes fecales que se traduce en material orgánico que debe ser degradado y generó sus valores altos en época donde ocurre mayor lavado y arrastre desde zonas urbanas adyacentes. Se observaron diferencias significativas entre las temporadas de lluvias y secas, DBO₅ aumentó en temporadas de lluvias, lo cual puede estar relacionado con el arrastre de materia orgánica del medio circundante hacia los cenotes por la escorrentía.

DQO

Todos los sitios presentaron valores inferiores al LMP (84 mg/L) de la NOM-001-SEMARNAT-2021. Los sitios que presentaron mayor concentración de DQO fueron C2 y PC5, lo que concuerda con los valores de DBO₅ y coliformes fecales. Los valores de los sitios se encontraron dentro de los valores reportados por De la Lanza *et al.* (2006) de 2 a 45 mg/L, con excepción del sitio C2 que presentó valores de hasta 69 mg/L. Leal-Bautista (2011) reportó valores entre 0 y 103.5 mg/L de DQO en pozos y cenotes de la Riviera Maya. Si se toma en cuenta que las concentraciones de DQO obtenidos en los pozos asociados al ex basurero de Mérida de 3.44-53.44 mg/L (con excepción de un sitio con 379 mg/L), pueden representar condiciones de contaminación por materia orgánica; y considerando que concentraciones >40 mg/L de DQO en aguas superficiales se considera como incumplimiento de la calidad del agua (CONAGUA *et al.* 2022), podemos afirmar que los

valores de DQO obtenidos en los sitios C2 y PC5 (40-69 mg/L) son altos e indican este tipo de contaminación.

COT

En la temporada de secas todos los sitios superaron el LMP (21 mg/L) y en la temporada de lluvias solamente lo superó el sitio C2. Los tres sitios que presentaron las mayores concentraciones fueron C2, PC5 y C5, lo que concuerda con los valores igualmente altos de DQO. Se observaron diferencias significativas entre temporadas, los valores de COT disminuyeron en la temporada de lluvias, a diferencia del DBO₅ que aumentó. Consideramos que, debido a la filtración previa al análisis, el COT realmente representa el material orgánico disuelto que puede ser diluido en la temporada de lluvias. Los datos obtenidos en este estudio (11.93-40 mg/L) fueron inferiores al rango de variación de carbono orgánico (59-148 mg/L) observados en pozos del antiguo basurero de Mérida (CONAGUA, 2022). Desconocemos si los valores obtenidos indican contaminación, ya que en los cuerpos naturales pueden estar vinculados los procesos de degradación de la hojarasca y otro tipo de biomasa animal propia de los sitios. Sin embargo, debido a las características del sitio C2 consideramos que valores >30 mg/L de carbono orgánico pueden indicar contaminación en los cenotes urbanos. Es importante fomentar los estudios de carbono orgánico en la matriz agua en diferentes tipos de cuerpos de agua de la península de Yucatán que puedan contribuir al conocimiento del ciclo del carbono y como un indicador de calidad del agua.

Grasas y aceites

Las concentraciones de grasas y aceites fueron inferiores a los 6 mg/L. En temporada de secas los sitios C2, PC1 y PC5 fueron los sitios con mayor concentración de grasas y aceites, mientras que en la temporada de lluvias los sitios C2, C4 y PC5 fueron los que presentaron la mayor concentración. Las grasas y aceites son un contaminante específico que puede variar por contaminación puntual y flujos de agua subterránea. Los valores obtenidos fueron inferiores al LMP de la NOM-001-SEMARNAT-2021. Sin embargo, consideramos importante el seguimiento de la evaluación de este parámetro. CONAGUA (2022) indica que las grasas y aceites originadas de la industria hotelera y restaurantera, de basureros y la industria automotriz son un riesgo para el acuífero.

Nitrógeno total

Los valores de NT variaron en los sitios de estudio. En la mayoría de ellos esta variación fue de entre 5 y 20 mg/L, con excepción de los sitios C1 y C2 que alcanzaron valores cercanos a 30 mg/L. Estos sitios son diferentes, C1 presenta aguas cristalinas y es más profundo, mientras que el agua de C2 es turbia con sólidos suspendidos y olor desagradable. Sin embargo, ambos sitios se encuentran en la periferia de Cancún, dentro de AGEB con presencia de sumideros o fosas séptica (CONAGUA, 2022). El NT de C2 es principalmente orgánico y está relacionado con la presencia de materia orgánica, mientras que el NT de C1 es principalmente nitrógeno inorgánico disuelto. Las principales fuentes de contaminación de nitratos en la península de Yucatán son de origen urbano provenientes de aguas residuales domésticas y agrarias debido al abono nitrogenado (CONAGUA, 2022). Los valores encontrados en este estudio superaron los valores reportados en el norte de Quintana Roo por Leal-Bautista *et al* (2011) y De la Lanza *et al* (2006). La contaminación de nitratos inorgánicos presenta un riesgo a las especies acuáticas debido a que interfieren en el transporte de oxígeno, ya que en altas concentraciones transforman la hemoglobina y hemocianina a metahemoglobina y metamocianina, las cuales no transportan oxígeno (Camargo y Alonso, 2006). En ambos sitios se identificó la presencia de peces, sin embargo, consideramos que es importante el monitoreo continuo de las concentraciones de nitratos, principalmente en el sitio C1 que tiene alto uso recreativo por los residentes de la zona.

Fósforo total

Todas las concentraciones de PT fueron menores al LMP (10 mg/L). De acuerdo con la escala del estado trófico (Carlson, 1976), estos están clasificados como oligotróficos. Sin embargo, el fósforo es un nutriente limitante en el acuífero kárstico de la Península de Yucatán, ya que las moléculas de fósforo se adhieren a los carbonatos y bicarbonatos presentes en el agua subterránea, y la limitación de luz no permite el crecimiento del fitoplancton y por lo tanto limita la integración del fósforo al material vivo (Alcocer *et al.* 1998). Los valores que se obtuvieron en este estudio están en el rango de 0.08-2.72 mg/L, lo cual concuerda con el rango (0.3-2.23 mg/L) reportado por Leal-Bautista (2011) y De la Lanza (2006). Los bajos valores de fósforo no necesariamente indican que los cuerpos de agua tengan una calidad del agua buena o excelente, se deben de contemplar los otros parámetros. Por otra parte, siete de

los diez cenotes de este estudio aumentaron las concentraciones de fosforo total en lluvias, por lo cual el fosforo puede ser principalmente de origen alóctono.

Toxicidad aguda

Solamente el sitio PC5 presentó toxicidad aguda en temporada de secas. Consideramos que la toxicidad aguda en *Vibrio fisheri* fue debido a la materia orgánica, las altas concentraciones de amonio y el bajo nivel de oxígeno disuelto <0.01 mg/l que no permitió la presencia de bacterias aerobias para promover el proceso de nitrificación. Este sitio presentó contaminación por desechos orgánicos, principalmente de origen fecal por los altos valores de coliformes fecales y enterococos. El amoniaco ionizado (NH_4^+) y no ionizado (NH_3), que están en equilibrio químico, son tóxicos; en particular, se sabe que el NH_3 causa toxicidad a las bacterias *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*, inhibiendo los procesos de nitrificación y por lo tanto intensifica la acumulación de NH_4^+ y NH_3 y, con ello, la afectación a las especies acuáticas por distintos factores como: el daño en las branquias, la inhibición de la producción de ATP, la afectación a los vasos sanguíneos, hígado y riñones, y la depresión del sistema inmunitario (Camargo y Alonso, 2006). Por otra parte, simplemente la ausencia de oxígeno disuelto limita la luminiscencia de la bacteria *Vibrio fisheri*. En el sitio PC5 no visualizamos la presencia de peces, por lo que se consideramos que la salud del ecosistema ya se encuentra comprometida. En la temporada de lluvias PC5 no presentó toxicidad aguda, la concentración de DQO disminuyó y DBO5 y el oxígeno disuelto aumentaron. Se considera que PC5 es un sitio que requiere de monitoreo y acciones de control para disminuir los contaminantes que afectan la calidad del agua.

Los otros sitios presentaron el efecto de hormesis, en el cual las concentraciones bajas de toxicidad causan estimulación de la luminiscencia de la bacteria *Vibrio fisheri*, mientras que concentraciones altas de toxicidad causan la inhibición de la luminiscencia.

C) Parámetros biológicos

Coliformes totales, *E. coli* y *Enterococcus*

En todos los sitios se presentaron coliformes totales y *E. coli*, en PC5 también se detectó *Enterococcus*. Los sitios que presentaron los valores más bajos de *E. coli* en algunas de las estaciones fueron C1, C4, PC2 y PC4, los primeros tres son sitios más profundos,

semicerrados y posiblemente integradas a sistemas de cavernas. El sitio C2 presentó la mayor contaminación de *E. coli*; de acuerdo con las referencias de residentes de la zona, el sitio está ubicado en un asentamiento en la periferia de la ciudad donde se emplean fosas sépticas. Por otra parte, dentro de la caverna están presentes colonias de murciélagos que defecan constantemente en el sitio. Otro de los sitios con mayor concentración de contaminación bacteriológica fue PC5, este es un parque concurrido dentro de la ciudad. Los sitios C2 y PC5 también presentan las concentraciones más altas de DBO₅ y DQO. En temporada de lluvias el sitio C3 alcanzó >2419 NMP/100 mL. Es importante destacar que en este sitio en la temporada de lluvias identificamos heces sólidas posiblemente de origen humano, en la piedra caliza cercana al agua junto con residuos de papel higiénico.

Borbolla *et al* (2020) y Rosiles-González (2017) han reportado coliformes totales y fecales en Cancún. Los valores de *E. coli* variaron entre <1 a ≥ 2400 NMP/100 mL. En este estudio el valor más bajo fue de 40.4 NMP/100 mL. Ocho de los diez cenotes reportados por Borbolla *et al.* (2020) se encontraron por encima del LMP de coliformes fecales para uso recreativo (200 NMP/100 mL) en al menos una de las temporadas en que realizó su estudio. En nuestra investigación, todos los cenotes en alguna de las dos temporadas superaron los 200 NMP/100 mL de *E. coli*. De la Lanza (2006) reportó en Solidaridad concentraciones de hasta 8000 NMP/mL de coliformes fecales y valores entre 10 y 450 NMP/100 mL de *Enterococcus*.

Los datos obtenidos en esta tesis identifican, en conjunto con los estudios previos, la persistencia de contaminación fecal en los cenotes de Cancún y Playa del Carmen. Concordamos en la importancia de la medición de *E. coli* en los cenotes urbanos, principalmente en los sitios con usos recreativos que son un riesgo para la salud humana. Además, es importante la medición de *Enterococcus* en cenotes salobres, ya que a pesar de que en la temporada de secas PC5 tuvo de *E. coli* 1119.9 NMP/100 mL, la concentración de *Enterococcus* alcanzó concentraciones de ≥ 2419 NMP/100 mL, lo que concuerda con la justificación de la NOM-001-SEMARNAT-2021 que indica que las especies de *Enterococcus* se adaptan mejor a las condiciones salinas que la *E. coli*.

Huevos de helmintos

En la península de Yucatán no existen datos previos sobre la concentración de huevos de helmintos en agua subterránea. Maya-Rendón (2000) reportó un promedio de 73 huevos/L,

en aguas residuales de la Planta de tratamiento de Cancún siendo los géneros encontrados: *Ascaris* spp, *Hymenolepsis* spp, *Trichuris* spp y *Toxocara* spp. Estos mismos géneros fueron los encontrados en el presente estudio. Por otra parte, Febles-Patrón (2010) reportó huevos de helmintos en lagunas de oxidación en Mérida, Yucatán, encontrando valores de 320,00 huevos/L en el influente y 140 huevos/L en el efluente. A pesar de que la medición de huevos de helmintos se encuentra desde la NOM-001-SEMARMAT-1996, los estudios en aguas residuales en Quintana Roo son escasos y no se han publicado datos de monitoreo.

En este estudio el cenote con más huevos de helminto fue el sitio C5, donde se contabilizaron 129 huevos/L de *Ascaris* sp. De acuerdo con CONAGUA (2022) la ascariasis se encuentra entre las cinco principales enfermedades de origen hídrico de la Península de Yucatán que son la amebiasis intestinal, la ascariasis, la desnutrición leve, la escabiosos, infecciones intestinales debidas a protozoarios, y otras salmonelosis. De acuerdo con el anuario de morbilidad de estados de México en el 2021 (https://epidemiologia.salud.gob.mx/anuario/html/casos_fuente.html), en Quintana Roo se presentaron 1500 nuevos casos de otras helmintiasis (13° lugar estatal con mayor número de casos), 798 casos de ascariasis (9° lugar) y en el 2020 hubo 12 casos de teniasis (4° lugar). La helmintiasis es un problema importante de salud pública y por ello es necesario analizar este parámetro en las fuentes de agua de contacto humano, como los cenotes. En todos los cenotes analizados en este estudio se encontraron valores positivos, los que en conjunto con los datos bacteriológicos confirman el grave problema de contaminación fecal del agua subterránea.

Pruebas estadísticas de agrupación

En los análisis de conglomerados de Bray-Curtis y NMDA no hubo agrupación entre los sitios (Cancún y Playa del Carmen) y temporadas (secas y lluvias), esto podría estar relacionado a contaminación puntual y constante en las zonas circundantes con los cenotes, y la escorrentía pluvial no afecta de forma significativa todos los parámetros analizados. Sin embargo, hubo una agrupación entre los sitios C2, C3, PC5 y C5, quienes concuerdan en ser los sitios con mayor concentración de indicadores fecales (Figura 3.20b), por lo tanto, el principal factor de agrupación es la contaminación fecal, lo que concuerda con el análisis de SIMPLER, siendo los coliformes el parámetro de mayor contribución a las diferencias observadas en el índice de Bray-Curtis. Por otra parte, la agrupación de los sitios menos

contaminados, como fue el sitio C21y PC2 en el análisis de NMDA (Figura 3.21b) indica bajas concentraciones de indicadores fecales en relación con los otros sitios, sin embargo, no exenta la presencia de contaminación antropogénica ya que hubo el incumplimiento de calidad del agua en los parámetros de materia flotante y C1 fue el sitio con mayor NT.

3.4.2 Desarrollo de un Índice de Calidad del Agua que permite comparar la calidad del agua en cuanto al riesgo a la salud humana y el ecosistema

La metodología utilizada fue útil para generar un índice de calidad del agua para cuerpos de agua kársticos. Actualmente la NOM-001-SEMARNAT-2021 es la única normativa mexicana que contempla los sistemas kársticos y emplea límites máximos permisibles que consideran la vulnerabilidad de estos sistemas. La metodología empleada fue en relación con el método que empleó Sánchez *et al* (2016) para la elaboración de un índice de calidad del agua con base en la NOM-127-SSA1-1994 para uso y consumo de agua potable, el método tiene la ventaja de brindar una calificación de calidad del agua de acuerdo con los límites máximos permisibles que indiquen la normativa empleada.

Los dos ICA desarrollados integran todos los parámetros básicos (físicos, químicos y biológicos) que solicita la NOM-001-SEMARNAT-2021 y la NOM-001-SEMARNAT-1996, por lo que permite brindar una evaluación general de los cuerpos de agua. El método de agregación de suma ponderada brinda la oportunidad de darle mayor importancia a los parámetros que sean de mayor riesgo para la salud humana y del ecosistema, como es el caso de los indicadores fecales y la toxicidad aguda. Además, permite integrar diferentes números de parámetros, así como datos continuos y de ausencia/presencia (datos binarios).

El método empleado permitió realizar la comparativa entre las normativas NOM-001-SEMARNAT-2021 y NOM-001-SEMARNAT-1996, las cuales difieren en el número de parámetros y en los límites máximos permisibles, por lo cual no son comparables entre sí. Sin embargo, el ICA es una metodología que al considerar los mismos criterios, método y conjunto de datos permite obtener una comparativa entre las normativas. La regresión lineal de R² de 0.71 (Figura 2.23) entre los ICA confirma que ambos tienen la misma tendencia, sin embargo, el ICA de la NOM-001-SEMARNAT-2021 es mejor en detectar las condiciones de contaminación al indicar grados de contaminación más altos que el ICA de la NOM-001-SEMARNAT-1996.

El aporte principal de este estudio fue el desarrollo de un ICA que contribuye a identificar condiciones de contaminación del agua en sistemas kársticos. Mediante el ICA de la NOM-001-SEMARNAT-2021 se puede discutir la variación en la estacionalidad y la cercanía con la costa.

1. Variaciones estacionales

En relación con las estacionalidades, los sitios C2, C3 y PC1 aumentaron a categorías más contaminadas en temporada de lluvias, esto principalmente asociado al incremento de la concentración de los indicadores fecales (*E. coli* y huevos de helmintos). En contraste, los sitios C4 y C5 disminuyeron a categorías menos contaminadas en temporada de lluvias, en estos sitios las concentraciones de los indicadores fecales disminuyeron. Por otro lado, cuatro sitios se mantuvieron en la misma categoría en ambas temporadas: C1 en excelente, los sitios PC2, PC3 y PC4 en calidad del agua buena. Las variaciones de las concentraciones de los parámetros en las temporadas de secas y lluvias estarían relacionadas principalmente con el arrastre de contaminantes (desechos urbanos, fecalismo libre, lodos) por medio de la escorrentía en la temporada de lluvias, o un efecto contrario de dilución por las precipitaciones (Smith *et al.*, 2020; Bauer-Gottwein *et al.*, 2011). Diversos estudios han indicado que los parámetros pueden variar con la estacionalidad. En algunos cenotes aumentan las concentraciones en temporada de lluvias y en otros disminuyen. Por ejemplo, en Cancún, Borbolla-Vázquez *et al.* (2020) indicaron que seis de diez cenotes aumentaron las concentraciones de coliformes fecales, mientras que Rosiles-González *et al.* (2017) identificó un aumento en la concentración de coliformes fecales en temporada de secas en uno de los dos cenotes estudiados.

En Playa del Carmen el estudio de De la Lanza *et al.* (2006) reportó distintas variaciones entre los meses de noviembre (vientos), marzo (secas) y agosto (lluvias): tres de cinco cenotes aumentaron sus concentraciones de DQO en marzo, tres aumentaron las concentraciones de enterococos en noviembre, cinco tuvieron las concentraciones más altas de NT en noviembre y cuatro tuvieron las concentraciones más altas de ortofosfatos en agosto. En este estudio la tendencia indicó que *E. coli*, DBO₅, PT aumentaron en lluvias, mientras que COT, NT, huevos de helminto y color verdadero disminuyeron sus concentraciones en lluvias. El ICA engloba las tendencias de acuerdo con el peso de los parámetros. Es importante indicar que

la mayoría de los sitios se mantuvo en su misma categoría del ICA. Por lo anterior, consideramos que las variaciones con relación a la estacionalidad indican desechos contaminantes cercanos a los cuerpos del agua, pero igualmente contaminación directa de forma continua por descargas de aguas residuales presente en ambas temporadas del año.

2. Cercanía de la costa

En cuanto a la cercanía a la costa, está comprobado que, por los flujos del agua subterránea, la zona costera recibe la mayor carga de sustancias provenientes de la zona continental por el efecto de la acumulación de contaminantes por actividades agrícolas, industriales y urbanas de los núcleos poblacionales (Bauer-Gottwein *et al.* 2011). En Cancún, en la temporada de secas, el sitio C5 (4.4 km), el cual es el más cercano a la costa, si coincidió en ser el más contaminado de acuerdo con el ICA NOM-001-2021. Pero, en la temporada de lluvias el más contaminado fue C2 (12 km), que es el segundo más lejano. El sitio C1 (15 km) fue el sitio más alejado en Cancún y el menos contaminado en ambas temporadas. En Playa del Carmen, el sitio PC5 (1.7 km), que es el más cercano a la costa coincidió en ser el más contaminado en ambas temporadas; y el sitio PC3 (4.5 km) que es el más lejano se clasificó en la categoría de buena calidad, pero no es el menos contaminado. Debido a lo anterior, se deduce que las descargas de aguas residuales en los cenotes o cercanas a éstos, son el principal factor que afecta la calidad del agua.

3.4.3 Comparación del índice de calidad del agua en base a las condiciones de la NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-001-SEMARNAT-2021

Mediante el ICA con base en la NOM-001-SEMARNAT-2021 se detectan grados de contaminación más altos que un ICA con base en la NOM-001-SEMARNAT-1996. En la tabla 3.5 se presenta una comparativa que indica el número de cenotes que estuvieron en las categorías de excelente, bueno, regular, pobre y extremadamente pobre. En el ICA con base en la NOM-001-SEMARNAT-1996 la mayoría de los sitios se encuentran en excelente (once), mientras que con el ICA de la NOM-001-SEMARNAT-2021 solamente tres cenotes se clasificaron en excelente. Igualmente, en la suma de las categorías de calidad pobre y extremadamente pobre en el ICA con base en la NOM-001-SEMARNAT-1996 solamente dos cenotes se encontraron en esas categorías, mientras que con el ICA de la NOM-001-SEMARNAT-2021 fueron seis cenotes. Consideramos que las diferencias más relevantes

entre los ICA están relacionadas con los LMP, la NOM-001-SEMARNAT-2021 tiene LMP inferiores en comparación con la NOM-001-SEMARNAT-1996. Destaca la disminución de los LMP para la concentración de *E. coli* y huevos de helmintos, así como la cantidad de sólidos suspendidos y de grasas y aceites. Esto implica que el ICA NOM-001-2021 es mejor en la detección para la descarga de aguas residuales y sus potenciales riesgos a la salud pública. Por otra parte, la inclusión de otros parámetros de calidad del agua que no estaban contemplados en la NOM-001-SEMARNAT-1996 como DQO, color verdadero, COT, *Enterococcus*, NT, PT y toxicidad aguda, permite enfatizar no solo los riesgos a la salud humana, sino también a los del ecosistema. Por lo anterior, se considera que el ICA basado en la NOM-001-SEMARNAT-2021 es más eficaz para evaluar la calidad del agua de sistemas cársticos urbanos.

Tabla 3.5 Comparación de la NOM-001-SEMARNAT-1996 y 2021.

Norma	Ciudad	Temporada	Excelente	Bueno	Regular	Pobre	Extremadamente pobre
ICA 1996	Cancún	Secas	1	2	1	0	1
		Lluvias	3	0	2	0	0
	Playa del Carmen	Secas	4	0	0	1	0
		Lluvias	3	1	1	0	0
Total			11/20	3/20	4/20	1/20	1/20
ICA 2021	Cancún	Secas	1	0	2	1	1
		Lluvias	2	1	0	1	1
	Playa del Carmen	Secas	0	3	1	0	1
		Lluvias	0	3	1	1	0
Total			3/20	7/20	4/20	3/20	3/20

En relación con que el ICA con base en la NOM-001-SEMARNAT-2021 es más eficiente en la detección de contaminación, se discutirá a continuación las categorías de contaminación detectadas en los CADKU.

Contaminación de los CADKU con base en el ICA-2021

En términos generales, de acuerdo con el ICA-2021, los sitios C2, C5 y C3 de Cancún, y los sitios PC5 y PC1 de Playa del Carmen son los más contaminados y requieren de acciones de gestión para salvaguardar la integridad del ecosistema acuático. Mientras que los sitios C1,

C4, PC2, PC3 y PC4 requieren de un monitoreo continuo para evitar el empobrecimiento de la calidad del agua.

El sitio C1 de Cancún con calidad del agua clasificada como excelente puede continuar siendo un sitio recreativo ya que al tener escasas concentraciones de coliformes fecales y de huevos de helminto el riesgo de contraer enfermedades por estas causas es menor. Sin embargo, es importante el monitoreo del nitrógeno inorgánico pues es el sitio donde se detectó la mayor concentración (30.36 y 26.98 mg/L). Es necesario determinar las posibles fuentes de contaminación, e incluir reglamentación para evitar la introducción de residuos sólidos urbanos (envases, bolsas, plásticos) al cuerpo de agua. El sitio C2, con calidad del agua pobre y extremadamente pobre es un cuerpo de agua con una alta contaminación de materia orgánica y coliformes, por lo que representa un riesgo latente para la salud humana. Por lo anterior, se requieren acciones de aislamiento para evitar el contacto con el público en general, así como acciones de saneamiento, control de la fauna nociva y restauración del hábitat. Los sitios C3 y C5 presentaron alta contaminación fecal en alguna de las temporadas (calidad de agua pobre y extremadamente pobre), y en menor medida el sitio C4 (calidad del agua regular y buena). En los sitios C3 y C5 se deben aplicar acciones para restringir el fecalismo humano y de fauna nociva, así como indicar que no se debe de existir contacto físico con el agua. Al estar en parques urbanos también se debe de promover la limpieza y el control de los desechos urbanos. El sitio C4 requiere un monitoreo periódico de coliformes ya que éste se emplea para actividades de nado. Es importante informar a la comunidad cuando las concentraciones de *E. coli* sean mayores a los 200 NMP/100 mL.

En Playa del Carmen, el sitio PC1 presentó contaminación fecal (calidad del agua regular), y en menores concentraciones los sitios PC3 y PC4 (calidad del agua buena). Al estar ubicados estos cuerpos de agua dentro de parques y áreas verdes, se debe de evitar el fecalismo libre de los animales domésticos, así como la implementación de medidas que impidan el desecho de residuos y de un sistema de información la población. El sitio PC2 tuvo concentraciones bajas en coliformes (calidad del agua buena), sin embargo, al estar localizado en un área verde sobre una carretera, consideramos que no sería seguro promover actividades recreativas sin vigilancia. El sitio PC5 es un sitio con alta contaminación fecal (calidad del agua pobre y extremadamente pobre) y fue el único en que se detectó toxicidad

aguda, siendo un riesgo para las personas, los animales y para el propio ecosistema. Este sitio al igual que el sitio C2 en Cancún, requieren permanecer en aislamiento y sujetos a procedimientos de saneamiento.

CONCLUSIONES

La cuantificación de los parámetros físicos, químicos y biológicos de calidad del agua indicaron que en los coliformes fecales, huevos de helmintos, carbono orgánico disuelto, toxicidad aguda, nitrógeno total, sólidos suspendidos y color verdadero no se cumplió con los límites máximos permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-2021 y NOM-001-SEMARNAT-1996, por lo que los cuerpos kársticos urbanos de Cancún y Playa del Carmen (principalmente los CADKU C2, PC5, C3, C5 y PC1) presentan el riesgo a la salud humana y ecosistémica por la descarga de aguas residuales.

La metodología utilizada para el desarrollo de un ICA permite comparar la calidad del agua de los cuerpos de agua kársticos urbanos con base en las normativas de aguas residuales ya que clasifica los grados de contaminación con base en el grado de incumplimiento de la normativa.

El ICA elaborado con base en la NOM-001-SEMARNAT-2021 es eficaz para evaluar la calidad del agua de cuerpos de agua kársticos urbanos de Cancún y Playa del Carmen ya que la integración del conjunto de parámetros físicos, químicos y biológicos de calidad del agua con límites máximos permisibles que consideran la vulnerabilidad de los ecosistemas acuáticos kársticos detecta los CADKU en condiciones de contaminación. Un ICA basado en la NOM-001-SEMARNAT-2021 es más eficaz que un ICA basado en la NOM-001-SEMARNAT-1996 ya que detecta con mayor severidad los cuerpos de agua kársticos que tiene mala calidad del agua.

3.4.14 RECOMENDACIONES

a) Recomendaciones para mejorar la calidad del agua subterránea

Estrada-Medina *et al.* (2019) indican que entre las estrategias de conservación del acuífero kárstico está el frenar el crecimiento desordenado de los asentamientos humanos y las actividades productivas, y regular el vertido de aguas residuales a suelos y cuerpos de agua. Los resultados de este trabajo concuerdan con esta aseveración, por lo tanto, además de ejecutar acciones localizadas de limpieza, control de fauna nociva, educación ambiental y remediación de cada cuerpo de agua, es muy importante promover el acceso al derecho de saneamiento, disminuir el uso de fosas sépticas y aumentar la conexión de las viviendas al sistema de drenaje público, así como la implementación de tratamientos terciarios en las plantas de tratamiento de aguas residuales.

c) Recomendaciones para otros estudios

Las descargas de aguas residuales pueden estar causadas por el derrame de aguas negras de las fosas sépticas, por fugas del sistema de drenaje y por los procesos de escorrentía que arrastra a los cenotes sustancias de los terrenos circundantes estos. Se identificó que los cenotes que presentaron contaminación en Cancún se encuentran en las AGEB (área geostatística básica) vinculadas a sumideros y fosas sépticas de acuerdo con el mapa titulado “Problemática de las aguas servidas en Cancún” de Domínguez-Aguilar (2004) reportado por CONAGUA (2022). La falta de servicios municipales de saneamiento y por tanto el uso de sumideros y fosas sépticas se vincula con grados de marginación. Muñoz-Euan (2019) realizó un estudio socioeconómico e hídrico en la comunidad de Tres Reyes en Cancún, y reportó que la zona no cuenta con agua entubada ni con sistema de drenaje, por lo que emplean pozos para abastecerse de agua y el 96.7% utilizan fosas sépticas.

En Cancún y Playa del Carmen, los sitios detectados con mayor contaminación en ambas temporadas o en alguna de ellas fueron C2, C3, C5, PC1 y PC5, los cuales se encuentran localizados dentro de las AGEB clasificadas en media y alta marginación de acuerdo con el índice de rezago social de CONEVAL (2022). Además, mediante el ICA basado en la NOM-001-SEMARNAT-2021 se identificó que, en Cancún, los CADKU alcanzaron las categorías más altas de contaminación (pobre y extremadamente pobre) respecto a los sitios de Playa

del Carmen (Figura 3.22b y 2.22d). Esto puede estar relacionado con la densidad poblacional ya que la ciudad de Cancún triplica el número de habitantes de Playa del Carmen, en el 2020 INEGI cuantificó en Benito Juárez 911, 503 habitantes y en Solidaridad 333,800 habitantes (INEGI, 2021). Esto supondría que la cantidad de aguas residuales que se generan en las viviendas que llegarían potencialmente al acuífero por desborde de las fosas sépticas o fugas sería mayor en Cancún que en Playa del Carmen. Por lo tanto, se recomienda para otros estudios analizar calidad del agua en conjunto con evaluaciones de rezago social y presión antropogénica para determinar la correlación de la contaminación del agua con la falta de saneamiento y crecimiento poblacional.

3.4.15 PERSPECTIVAS PARA EL ICA NOM-001-2021

El uso continuo del ICA con base en la NOM-001-SEMARNAT-2021, contribuiría a identificar los sitios que presentan un riesgo para la salud humana y del ecosistema, así como para evaluar las actividades de gestión del acuífero. A pesar de que la medición del conjunto de parámetros crea un gasto económico, éste se justifica ya que el propósito fundamental sería evitar un problema de salud pública, así como de la disminución de la calidad del recurso hídrico y la pérdida de los ecosistemas acuáticos.

El ICA elaborado por Sánchez *et al.* (2016) basado en las concentraciones de iones y cationes, es eficiente para identificar contaminación relacionada por procesos de intrusión salina en el acuífero. Debido a que se basa en la NOM-127-SSA-1994, también permite delimitar los sitios adecuados para ser utilizados como fuentes de agua potable seguros o que requieran procesos de desinfección y potabilización más sencillos. Consideramos que el ICA de la NOM-001-SEMARNAT-2021 que presentamos en este estudio puede ser complementario al ICA elaborado por Sánchez *et al.* (2016). De esta forma se podrían clasificar las zonas óptimas para agua potable, los sitios adecuados para recreación y las zonas de riesgo por infiltración o contaminación por aguas residuales. En este estudio nos enfocamos en los cuerpos de aguas kársticas naturales urbanos (cenotes), que son sitios vulnerables debido a la interacción continua con actividades antropogénicas. Sin embargo, también sería importante aplicar el ICA construido en esta investigación para muestras de pozos urbanos posteriores a la entrada en vigor del NOM-001-SEMARNAT-2021.

BIBLIOGRAFÍA

Abbasi, T., Abbasi, S. A. (2012) *Water Quality Indices*, ELSEIVER, Great Britain.

Alcamo, J., Ash, N., Butler, C., Callicott, J., Capistrano, D., Carpenter, S., Castilla, J., Chambers, R., Chopra, K., Cropper, A., Daily, G., Dasgupta, P., Groot, R., Dietz, T., Duraiappah, A., Gadgil, M., Hamilton, K., Hassan, R., Lambin, E., Lebel, L., Leemans, R., Jiyuan, L., Malingreau, J., May, R., McMichael, T., Moldan, B., Mooney, H., Naeem, S., Nelson, G., Wen-Yuan, N., Noble, I., Zhiyun, O., Pagiola, S., Pauly, D., Percy, S., Pingali, P., Prescott-Allen, R., Reid, W., Ricketts, T., Samper, C., Scholes, R., Simons, H., Toth, F., Turpie, J., Watson, R., Wilbanks, T., Williams, M., Wood, S., Shidong, Z., Zurek (2009). *Ecosystems and human well-being: a framework for*, Island Press, Washington.

Alcocer, J., Lugo, A., Marín L. E. (1998) Hydrochemistry of waters from five cenotes and evaluation of their suitability for drinking-water supplies, northeastern Yucatan, México, *J. Hydrol.* 6, 293-301.

AGUAKAN (s.f.) Nuestra actividad.

<https://www2.aguakan.com/nuestra-actividad/> Consultado: 20 de mayo de 2021.

Aguilar-Flores, V. S. (2020). Evaluación de la distribución de las condiciones salinas en el sistema hidrogeológico del noreste de Quintana Roo. Tesis de maestría, CICY, México.

Beddows, P. Smart P.W, Whitaker, F., Smith S. (2007) Decoupled fresh–saline groundwater circulation of a coastal carbonate aquifer: Spatial patterns of temperature and specific electrical conductivity, *J. Hydrol.*

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.08.013>

Bauer-Gottwein, P., Bibi Gondwe, Guillaume Charvet, Luis E. Marín, Rebolledo-Vieyra, M, Merediz-Alonso, G. (2011) Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, México, *J. Hydrol.* <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0699-5>

Beddows, P., Blanchon, P., Escobar, E., Torres-Talamante, O. (2002) Los cenotes de la Península de Yucatán, *Arqueol. Mex.* 83, 32-35.

Borbolla-Vázquez, J., Ugalde-Silva, P., León, Borges J., Díaz-Hernández, J. (2020) Total and fecal coliforms presence in cenote of Cancun; Quintana Roo, Mexico, *BioRisk.*

<https://doi.org/10.3897/biorisk.15.58455>

Brown, R., McClelland, N., Deininger, R., Tozer, R. (1970) A Water Quality Index: Do We Dare? *Water Sewage Works.* 117, 339-343.

Camargo, J., Alonso, Á. (2006) Efectos ecológicos y toxicológicos de la contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: una evaluación global, *Medio Ambient. Int.*

<https://doi.org/10.1016/j.envint.2006.05.002>

Campos, M. C., Beltrán, M., Fuentes, N., Moreno, G. (2018) Huevos de helmintos como indicadores de contaminación de origen fecal en aguas de riego agrícola, biosólidos, suelos y pastos, *Biomédica*.

<https://doi.org/10.7705/biomedica.v38i0.3352>

Cañete, C. (2019) The importance of the control and monitoring of the water quality of the Paraguay River for development and national defense, *Rep. Cient. FACEN*.

<http://doi.org/10.18004/rcfacen.2019.10.1.17>

Chapelle, F. H. (2001) *Ground-water microbiology and geochemistry*, John Wiley & Sons, Inc., New York.

CE-CCA-001/89 (1989) Acuerdo por el que se establece los criterios ecológicos de calidad del agua. *Legislación mexicana*.

<http://legismex.mty.itesm.mx/acu/acca001.pdf> Consultado: 12 agosto del 2021.

Cejudo, E., Herrera-Caamal, K. (2019) Humedales en dolina del norte de Quintana Roo, México: ecosistemas poco conocidos, *Ecosi. Recur. Agropec.*

<https://doi.org/10.19136/era.a6n17.1827>

Cejudo, E. (2018) Los cenotes, Ciénegas y Humedales.

https://www.researchgate.net/publication/329371287_Los_Cenotes_Originalmente_publicado_en_wwwcienegasyhumedalesorg Consultado: 14 de mayo del 2021.

Cejudo, E. Ortega-Camacho, D., Alvarado-Flores, J., Acosta-González, G., Ríos-Ponce, J., Sánchez-Trujillo, M., Abundes, M., Espinosa-Puch, D. (2021) Tarjeta de reporte de cenotes urbanos de Cancún, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C. (CICY).

https://www.cicy.mx/Documentos/CICY/sitios/Divulgacion/Articulos/2021/Tarjetas_de_reporte_final.pdf Consultado: 28 de julio del 2021.

Centinelas del Agua (2021) Conociendo resultados de la red de monitoreo de calidad del agua del norte de Quintana Roo. [Video].

<https://www.facebook.com/CentinelasDelAgua/videos/789056548396111/> Consultado: 27 junio del 2022

CHEMetrics (2021) Chemical Oxygen Demand (COD) Vials.

<https://www.chemetrics.com/product-category/test-kits/chemical-oxygen-demand-cod-vials/> Consultado: 2 de septiembre del 2021

Cerón, L. M., Sarria, J. D., Torres, Johan S., Soto-Paz, J. (2021) Agua subterránea: tendencias y desarrollo científico, *Inf. Tecnol.*

<https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642021000100047>

COFEPRIS (2022) Manual operativo: Monitoreo de agua de contacto primario en el agua de mar de playas y cuerpos de agua dulce.

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/744437/Manual_Agua_Contacto_2022.pdf Consultado: 6 de marzo del 2023

CONAGUA, SEMARNAT (2013) Lineamientos para la clasificación de los humedales. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/165385/Clasificaci_n.pdf

CONAGUA, Pascual-Ramírez, R., López-Quiroz, M., Loranca-Domínguez, Y., Ledesma-Ledesma, J., Zavala-Fajardo, A., Martínez-Melgarejo, A., Quintero-Vallejo, E., Gómez-Camacho, J. (2021) Reporte del clima en México. Reporte anual 2021.

<https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/Anual2021.pdf>
f Consultado: 16 de abril del 2022

CONAGUA, MEDIO AMBIENTE. (2022a). Programa Hídrico Regional 2021-2024. Región Hidrológico-Administrativa XII Península de Yucatán. https://files.conagua.gob.mx/conagua/generico/PNH/PHR_2021-2024_RHA_XII_Pen%C3%ADnsula_de_Yucat%C3%A1n.pdf Consultado: 28 de noviembre del 2022

CONAGUA, MEDIO AMBIENTE (2022b) Estadísticas del agua en México 2021. http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2021.pdf Consultado: 28 de noviembre del 2022.

CONAGUA-SEMARNAT (2015a) Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: zonas rurales, periurbanas y desarrollos ecoturísticos N° 31.

<https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro31.pdf> Consultado: 17 de marzo del 2021

CONAGUA-SEMARNAT (2015b). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Introducción al tratamiento de aguas residuales municipales N°25.

<https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro25.pdf> Consultado: 17 de marzo del 2021

CONEVAL. (2022) Grado de rezago social en las AGEB urbanas de las localidades de Quintana Roo.

https://www.coneval.org.mx/Medicion/IRS/Paginas/Rezago_social_AGEB_2020.aspx

Consultado: 18 de febrero del 2023

Estrada-Medina, H., Jiménez-Osornio, J. J., Álvarez-Rivera, O., Barrientos-Medina, R. C. (2019) The kast of Yucatan: its origin, morphology and biology, Acta Universitaria. <http://doi.org/10.15174.au.2019.2292>

Flebes-Patrón, Hoogestejin, A. (2010) Evaluación preliminar de la eficiencia en las lagunas de oxidación de la ciudad de Mérida, Yucatán. Ingeniería, 14 (2), 127-137.

De la Lanza-Espino, G., Hernández-Pulido, S., Penie-Rodríguez, I., Gómez Rojas J.C. (2006) Water Quality of the solidaridad municipality beaches, Medio Ambient. Turismo. Sustentabilidad. 2(1), 25-44.

De Victorica, J., Galván, M. (2003) Preliminary testing of a rapid coupled methodology for quantitation/viability determination of helminth eggs in raw and treated wastewater, *Water Research*.

[https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00477-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00477-3)

Domínguez-Aguilar, M. C. (2004) Uso y manejo del agua urbana como indicador de sustentabilidad urbana de Cancún, Quintana Roo. Tesis de Maestría, CINVESTAV, México.

Gaona-Vizcayno, S., Gordillo-de Anda, T., Villasuso-Pino, M. (1980) Cenotes, Karst característico: mecanismo de formación, *Univ. Nal. Autón. México, Inst. Geología*. 4 (1), 32-36.

Graniel C. E., Vera M., I., González Hita, L. (2004). Dinámica de la interfase salina y calidad del agua en la costa nororiental de Yucatán. *Ingeniería*, 8(3), 15-25.

Guillén-Hernández, S., Vidal-Martínez, V. M., Aguirre-Macedonio, M. L., Rodríguez-Canul, R. (2010) Helmintos. En: Durán R. y M. Méndez, *Biodiversidad y Desarrollo en Yucatán*, 209-212. CICY, PPD, FMAM, CONABIO, SEDUMA, México, pp. 202-212

Gutiérrez-Santoalla, F., Muñoz-Jiménez, A., Coloma- López, P. (2005-2006). Dolinas de subsistencia y de colapso en el karst carbonatado-aluvial de grávalos (La Roja). Origen y evolución, *Zubía (23-24)*, 59-78.

H-Ayuntamiento de Solidaridad (2021). Saneamiento de cenotes, cavernas y grutas del municipio de solidaridad.

<http://www.geolander.com.mx/solidaridad/mapa.html> Consultado: 15 de febrero del 2022

Herrera Silveira, J. A. (1999). Patrones de variación espacial y temporal de la biodiversidad fitoplanctónica de los cenotes abiertos de Yucatán. Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados-Mérida. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. M011. México, D.F.

<http://www.conabio.gob.mx/institucion/cgi-bin/datos2.cgi?Letras=M&Numero=11>

Consultado: 29 de junio del 2021.

Hernández-Flores, C. (2018). Ocurrencia de novovirus, virus de hepatitis A y reovirus en cuerpos de agua del norte de Quintana Roo: predicciones de riesgos para la salud. Tesis de Maestría, CICY, México.

Horton, R. (1965). "An Index Number System for Rating Water Quality," *J. Water Pollut. Control Fed.* 37, 300-306.

Hoz-Zavala, M. E., Torres-Rivero, L. (2018) Environmental impact exerted don the natural water bodies of Quintana Roo and Tamaulipas, México. *Rev. Investig. Desarro.* 4 (13), 14-2.

IDEXX. (s.f). Colilert.

<https://al.idexx.com/es-xl/water/water-products-services/colil> Consultado: 17 de octubre del 2021.

INEGI. (2021). Quintana Roo: División municipal. Cuéntame, INEGI. http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/qroo/territorio/div_municipal.aspx?tema=me&e=23 Consultado: 18 agosto del 2021.

IMTA. (2021). Actualización de la NOM 001 SEMARNAT 2021: hacia una mejor calidad en los cuerpos de agua. [Video]. <https://www.youtube.com/watch?v=7I4VUy59NjI&t=3206s> Consultado el 10 de septiembre del 2022

Leal-Bautista, R. M., Hernández-Zárate, G., Jaime M. N., Cuevas R. G., Velazquez-Oliman, G. (2011) Pathogens and pharmaceutical pollutants as indicators of contamination at the northeastern aquifer of Quintana Roo. *Trop. Subtrop. Agroecosyt.*, 13 (2), 211-219.

Leal-Bautista, R., Lenczewski, M., Acosta-González, G., Grimaldo-Hernández, C. (2019) Evaluation of water quality through the distribution system in Cancun, Mexico, *Soc. Ambient.*
<https://doi.org/10.31840/sya.v0i21.2039>

Leal-Bautista, R., Lenczewski, M., Acosta-González, G., Grimaldo-Hernández, C. (2020) Evaluation of water quality through the distribution system in Cancun, Mexico, *Soc. Ambient.*
<http://doi.org/10.31840/sya.v0i21.2039>

Lizárraga-Mendiola, L., De león-Gómez, H., Medina-Barrera, F., Návar, J. (2006) Calidad del agua subterránea en Linares, Nuevo León, México, *Ciencia UANL*, 9, 426-460.

López-Maldonado, Y. y Berkes, F. (2017) Restoring the environment, revitalizing the culture: cenote conservation in Yucatán, México, *Ecol. Soc.*
<https://doi.org/10.5751/ES-09648-220407>

López-Monzalvo, M. (2017). Los servicios ecosistémicos como estrategia para la valoración del agua subterránea de la reserva geohidrológica del anillo de cenotes, Yucatán. Tesis de Maestría, CICY, México.

López-Páez, M., Corredor-Arjona, A., Duque-Beltrán, S., Moncada-Álvarez, L., Reyes-Harker, P., Rodríguez-Toro, G. (2012) Atlas de parasitología, Universidad Nacional de Colombia: Manual Moderno, Bogotá.

Martínez, M., Osorio, A. (2018) Validation of a method for real color analysis in water, *Rev. Fac. Cienc.*
<https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v7n1.68086>

Martins Pinheiro, Aline, Salla, Marcio Ricardo, & Bolanos Rojas, Maria Lyda. (2019). Tratamiento de aguas residuales provenientes de industria de productos de limpieza y desinfectantes por ozonización convencional y catalítica. *Ingeniare, Ingeniare. Rev. Chil. Ing.*
<https://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052019000200223>

Maya-Rendón, C., Salgado-Velásquez, G. S., Jiménez-Cisneros, B. (2000) Frecuencia y variación estacional de los géneros de huevos de helminto más comúnmente encontrados en aguas residuales de México. E: Congreso Nacional 2000 Ciencia y Conciencia Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales, 21-28 Marzo, Morelia, México

McClelland, N. (1974). Water quality index application in the Kansas river basin. EPA-907/74-001, Kansas, United States

Medina-Moreno, A., Jiménez-González, M., Gutiérrez-Rojas, M., Lizardi-Jiménez, M.A. (2014) Estudios de contaminación por hidrocarburos en cenotes de Quintana Roo relacionada al desarrollo turístico en el caribe mexicano, Rev. Mex. Ing. Quim. 13 (2), 5019-516.

Morales-Ojeda, S. M., Herrera-Silveira, J. A., Orellana, R. (2021) Almacenes de carbono en un paisaje de humedal cárstico a lo largo de un corredor transversal costero de la Península de Yucatán, Madera. Bosques.

<https://doi.org/10.21829/myb.2021.2742425>

Moran-Ramírez, J., Santacruz-De León, G., Ramos-Leal, J. (2018). Condiciones hidrogeológicas e hidrogeoquímicas. En: Reyes-Hernandez, H-, de Nova-Vázquez, J., Durán-Fernández, A. (ed). Reserva de la Biosfera Sierra del Abra Tanchipa Biodiversidad y acciones para su conservación, México, pp. 43-58.

Moreno-Pérez, P. A., Hernández-Tellez, M., Bautista-Gálvez, A. (2021) In danger one of the largest aquifers in the world, the Great Mayan Aquifer, based on monitoring the cenotes of the Yucatan peninsula, Arch. Environ. Contam. Toxicol.

<https://doi.org/10.1007/s00244-021-00869-5>

Mukate, S., Wagh, V., Panaskar, D., Jacobs, JA y Sawant, A. (2019) Desarrollo de nuevo modelo de índice integrado de calidad del agua (IWQI) para evaluar la potabilidad del agua, Indic. Ecol.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.034>

Muñoz-Euan, N. (2019). Vulnerabilidad del recurso hídrico desde la perspectiva socioambiental en dos localidades de Quintana Roo, México. Tesis de Maestría, CICY, México.

Norma Mexicana NMX-AA-006-SCFI-2010. Análisis de agua-Determinación de materia flotante en aguas residuales y residuales tratadas-Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-006-SCFI-2000). México

Norma Mexicana. NMX-AA-SCFI-2011. Análisis de agua-Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-028-1981). México.

Norma Mexicana. NMX-AA-030/1.SCFI-2012. Análisis de agua- Medición de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba de refluo abierto (Cancela a la NMX-AA-030-SCFI-2001). México.

Norma Mexicana. NMX-AA-113-SCFI-2012. Análisis de agua- Medición del número de huevos de helminto en aguas residuales y residuales tratadas por observación microscópica- Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-113-SCFI-1999). México

Norma Mexicana NMX-AA-005-SCFI-2013, Análisis de agua-Medición de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Métodos de prueba (cancela a la NMX-AA-005-SCFI-2000). México.

Norma Mexicana de Análisis NMX-AA-034-SCFI-2015. Análisis de agua- Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba (cancela a la NMX-AA-034-SCFI-2001). México

Norma Mexicana. NOM-011-CONAGUA-2015. Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.

Norma Mexicana NMX-AA-112-SCFI-2017. Análisis y sedimentos-Evaluación de toxicidad aguda con *Vibrio fischeri*-Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-112-1995-SCFI).

Norma Mexicana NMX-AA-186-SCFI-2021. Análisis de Agua-Enumeración de *Escherichia coli*, bacterias coliformes totales y bacterias coliformes fecales. Método del número más probable (NMP) “Enzima-Sustrato”. México

Norma Oficial Mexicana 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. México

Norma Oficial Mexicana. NOM-001-ECOL-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. México

Norma Oficial Mexicana. NOM-001-SEMARNAT-2021. Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. México.

Olivos-Ortiz, A. (2021). La urbanización turística del Caribe mexicano. <https://medioambiente.nexos.com.mx/la-urbanizacion-turistica-del-caribe-mexicano/>
Consultado el 18 de junio del 2021

Ortega-Camacho, D., Cejudo E. (2018) Manual de metodologías para análisis de agua. Laboratorio de Físicoquímicos y bacteriología, CICY-Unidad Ciencias del Agua, México.

Pérez-Villegas, Graciela, & Carrascal, Eurosia. (2000) El desarrollo turístico en Cancún, Quintana Roo y sus consecuencias sobre la cubierta vegetal. Invest. Geogr., (43), 145-166.

Proyecto de Norma Mexicana- PROY-NMX-AA-030/2-SCFI-2008. Análisis de agua-Determinación de demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba (ambas partes cancelan a la NMX-AA-030-SCFI-2001). México

Proyecto de Norma Mexicana. PROY-NMX-AA-017-SCFI-2020. Análisis de Agua-Medición de color verdadero en aguas naturales, residuales, residuales tratadas y marinas-Medición coeficiente de absorción espectral- Método de prueba (cancelará a la NMX-AA-017-1980). México.

Saeedi, M., Abessi, O., Sharifi, F., Meraji, H. (2010) Development of groundwater quality index, *Environ. Monit. Assess.*
<https://doi.org/10.1007/s10661-009-0837-5>

Sánchez, J. A., Álvarez, T., Pacheco J., Carrillo, L. y Amílcar-González, R. (2016). Calidad del agua subterránea: acuífero sur de Quintana Roo, México, *Tecnol. y Cienc. Del Agua* 7(4), 75-95.

Schmitter-Soto, J., Herrera-Silveira, J., Comín, F. y Alcocer, J. (2002). Hydrogeochemical and biological characteristics of cenotes in the Yucatan Peninsula (SE Mexico), *Hydrobiologia*, 467, 215-228.

SEMARNAT (2013). Indicadores de calidad del agua. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2013/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WFServlet28b9.html Consultado: 19 de marzo del 2021

Smith, D. Ortega-Camacho, D., Acosta-González, G., Leal-Bautista, R., Fox, W., Cejudo, E. (2020). A multi-approach assessment of land use effects on groundwater quality in a karstic aquifer, *Heliyon*.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03970>

Soltan, M. E. (1999) Evaluation of Ground Water Quality in Dakhla Oasis (Egyptian Western Desert), *Environ. Monit. Asses.*
<http://doi.org/10.1023/A:1005948930316>

Ramírez, A., Restrepo, R., Viña, G. (1997) Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales, *C T. F Cienc. Tecnol. Futuro*. 1 (3), 135-153.

Rosiles-González, G., Ávila-Torres, G., Moreno-Valenzuela, O., Acosta-González, G., Leal-Bautista, R., Grimaldo-Hernández, C., Brown, J., Chaidez-Quiroz, C., Betancourt, W., Gerba, C. y Hernández-Zepeda, C. (2017). Occurrence of pepper mottle virus (PMMoV) in groundwater from a karstic aquifer system in the Yucatan Peninsula, Mexico, *Food Environ Virol.*
<https://doi.org/10.1007/s12560-017-9309-1>

Rosiles-González, G., Ávila-Torres, G., Moreno-Valenzuela, O., Chaidez-Quiroz, C., Hernández-Flores, C., Acosta-González, G., Brown, J. K., Betancourt, W.Q., Hernández - Zepeda, C. (2019) Norovirus and human adenovirus occurrence and diversity in recreational water in a karst aquifer in the Yucatan Peninsula, Mexico, *Appl. Microbiol.*
<https://doi.org/10.1111/jam.14385>

Rocha, M. C. V. da, Barés, M. E., & Braga, M. C. B. (2016) Quantification of viable helminth eggs in samples of sewage sludge, *Water Res.*

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.07.039>

Rodríguez, M., Sánchez, A., Agudelo, R. (2022) Electrocoagulación con radiación UV para remover DQO, COT y SDT en aguas residuales de la industria textil empleando electrodos de grafito, *Rev. Invest. Agrar. Ambient.*

<https://doi.org/10.22490/21456453.4723>

Tomasini-Ortiz, A., Bravo-Inclán, L., Sánchez-Chávez, J. (2015) Evaluación de la PTAR Saástun-Já de la ciudad de Playa del Carmen, Q. Roo. <http://www.amica.com.mx/issn/archivos/109.pdf> Consultado: 07 de septiembre del 2021

Torres-Talamante, O., Alcocer, J., Beddows, P., Escobar-Briones, E. Lugo, A. (2011) The key role of chemolimnion in meromictic cenotes of the Yucatan Peninsula, Mexico, *Hydrobiologia*.

<https://doi.org/10.1007/s10750-011-0746-9>

Trujillo, E., Fonseca G., García M. y Martínez, V. (2019) Evaluación de la cromatografía iónica para fomentar su uso en la investigación y estudios de posgrado en ciencias del agua, *Form. Univ.*

<https://doi.org/10.4067/S0718-50062009000100003>

Yakub, G. P., Castric, D. A., Stadterman-Knauer, K. L., Tobin, M. J., Blazina, M., Heineman, T. N., Gim, Y. Y., Frazier, L. (2002) Evaluation of Colilert and Enterolert Defined Substrate Methodology for Wastewater Applications, *Water Environ. Res.*

<https://doi.org/10.2175/106143002x139839>

Valderrama, JC (1981). El análisis simultáneo de nitrógeno total y fósforo total en aguas naturales, *Quím. Mar.*

[https://doi.org/10.1016/0304-4203\(81\)90027-x](https://doi.org/10.1016/0304-4203(81)90027-x)

Vaz-Nery, S., Pickering, A.J., Abate, E., Asmare, A., Barret, L., Benjamin-Chung, J., Bundy D., Clasen, T., Clements, A., Colford, J. M., Ercumen, A., Crowley, S., Cumming, O., Freeman, M., Haque, R., Mengistu, B., Oswald, G., Pullan, R. L., Oliveira R. G., Einterz-Owen, K., Walson, J., Youya, A., Brooker, S. (2019) The role of water, sanitation and hygiene interventions in reducing soil-transmitted helminths: interpreting the evidence and identifying next steps, *Parasites Vectors*.

<https://doi.org/10.1186/s13071-019-3532-6>

Xiong-Xiong, K. Z., Xianchuan-Chen, H. S., Ze-Luo, C. W. (2018). Sources and distribution of microplastics in China's largest inland lake-Qinghai Lake, *Environmental Pollution*.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.081>

ANEXO A

Parámetros de calidad del agua en temporada de secas 2022.

Parámetro (mg/L)	C1	C2	C3	C4	C5	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
pH	7.16	7.84	7.31	7.02	7.54	7.33	6.92	7.03	7.17	7.05
T (°)	26	25.3	25.3	26.6	26.3	25.2	23.9	25.3	24.9	25.9
CE (µS/cm)	1143	730	1374	1659	1108	2760	2270	1859	1881	5670
OD	1.0	5.0	2.8	1.1	4.4	1.1	1.4	2.7	0.8	0.1
CF (NMP/100ml)	45.7	2419.6	866.4	613.1	1299.7	285.1	40.4	547.5	209.8	1119.9
E (NMP/100ml)										>2419.6
DBO5	4.5	6.5	4.3	6.5	5.0	5.5	5.5	5.5	6.0	8.5
DQO	7.34	46.9	8.83	7.18	21.91	15.45	9.99	9.33	11.32	39.51
COT	24.07	40.00	26.07	26.93	33.00	26.71	28.17	28.37	28.74	32.82
CAE 436 nm (m ⁻¹)	0.50	9.00	0.45	0.95	0.75	1.05	0.55	0.45	0.15	0.55
CAE 525 nm (m ⁻¹)	0.15	5.90	0.00	0.55	0.45	0.80	0.35	0.10	0.25	0.55
CAE 620 nm (m ⁻¹)	0.20	4.30	0.10	0.25	0.25	0.65	0.05	0.15	0.00	0.15
MF (+/-)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
SST	0.80	29.00	8.00	1.00	3.70	1.20	0.60	1.00	3.20	3.87
SS (ml/L)	0.1	0.4	0.1	0.1	0.2	0.099	0.099	0.099	0.099	1.5
GyA	1.86	4.80	2.50	0.97	0.78	5.62	1.44	1.96	0.96	3.58
TA(+/-)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
HH (huevo/L)	1.6	5.2	6.4	5	129	5.6	5.4	3	3.6	32.4
NT	30.36	30.08	15.60	12.14	10.87	12.85	16.17	7.44	14.91	18.25
PT	0.13	2.14	0.12	0.11	0.41	0.25	0.20	0.08	1.18	0.16

Nota. Color naranja indica incumplimiento de LMP. Simbología: T (Temperatura), CE (Conductividad eléctrica), CF (Coliformes fecales, OD (Oxígeno disuelto), E (Enterococos), DBO5 (Demanda química de oxígeno), DQO (demanda química de oxígeno), COT (carbono orgánico total), CAE (Coeficiente de absorción espectral), MF (materia flotante), SST (sólidos suspendidos totales), SS (sólidos sedimentables), GyA (Grasas y aceites), T A (Toxicidad aguda), HH (huevos de helmintos), NT (nitrógeno total), PT (fósforo total).

Parámetros de calidad del agua en temporada de lluvia 2022.

Parámetro (mg/L)	C1	C2	C3	C4	C5	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
pH	7.04	7.56	7.00	7.03	7.45	7.1	6.77	7.03	6.9	7.12
T (°)	27.3	26.4	26.9	27.1	26.7	26.3	26.6	25.7	26.3	26.5
CE (µS/cm)	1074	915	1394	1525	721	2130	2010	1792	1668	3720
OD	1.8	1.2	2.3	2.8	3.1	2.0	3.8	2.4	1.0	1.8
CF (NMP/100ml)	275.5	2419.6	2419.6	90.8	248.1	1986.3	328.2	579.4	98.5	2419.6
E (NMP/100ml)										>2419.6
DBO5	9.2	15.6	9.6	9.8	10.0	9.1	7.4	8.3	6.7	12.7
DQO	11.0	69.0	11.0	15.5	20.5	5.0	4.0	7.5	4.5	21.0
COT	15.95	31.25	13.64	13.86	18.75	15.01	14.77	17.13	11.93	17.33
CAE 436 nm (m ⁻¹)	0.20	2.35	1.00	0.00	0.85	0.00	0.10	0.10	0.20	1.85
CAE 525 nm (m ⁻¹)	0.00	0.90	0.65	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	1.10
CAE 620 nm (m ⁻¹)	0.00	0.35	0.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.85
MF (+/-)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
SST	0.40	28.00	79.00	1.60	3.50	2.00	3.50	2.70	2.30	3.70
SS (ml/L)	0.099	0.9	0.9	0.099	0.099	0.099	0.099	0.3	0.1	0.2
GyA	0.99	5.79	1.30	4.14	1.76	2.43	1.11	2.74	0.66	3.09
TA(+/-)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HH (huevo/L)	1.4	13.6	5.4	4	1.8	2.6	2.4	4.2	5	7.2
NT	26.96	18.23	16.11	14.30	4.82	12.81	13.10	4.76	10.44	17.83
PT	0.17	2.72	0.16	0.09	0.80	0.51	0.15	0.19	1.00	0.82

Nota. Color naranja indica incumplimiento de LMP. Simbología: T (Temperatura), CE (Conductividad eléctrica), CF (Coliformes fecales), OD (Oxígeno disuelto), E (Enterococos), DBO5 (Demanda química de oxígeno), DQO (demanda química de oxígeno), COT (carbono orgánico total), CAE (Coeficiente de absorción espectral), MF (materia flotante), SST (sólidos suspendidos totales), SS (sólidos sedimentables), GyA (Grasas y aceites), T A (Toxicidad aguda), HH (huevos de helmintos), NT (nitrógeno total, PT (fósforo total).