



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Posgrado en Ciencias Del Agua

**ESTADO TRÓFICO DE LOS CENOTES EN LA PENÍNSULA DE
YUCATÁN Y SU ASOCIACIÓN CON LOS PRINCIPALES GRUPOS DE
FITOPLANCTON**

Tesis que presenta

STEPHANY MOSCOSO ALEJO

En opción al título de

MAESTRA EN CIENCIAS DEL AGUA

Director: Dr. Antonio Almazán Becerril

Co-director: Dr. Aramis Olivos Ortíz

Cancún, Quintana Roo, julio de 2019.

DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

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

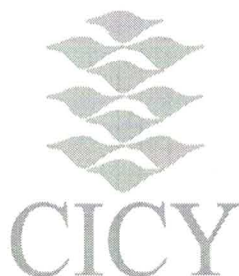


Cancún, Quintana Roo, a 21 de junio de 2019.

Stephany Moscoso Alejo

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 **Stephany Moscoso Alejo** titulado “**Estado trófico de los cenote en la Península de Yucatán y su asociación con los principales grupos de fitoplancton**” fue realizado en la Unidad de Ciencias del Agua, en la línea de Ecología y Dinámica de Sistemas Acuáticos, en el Laboratorio de Ecología Costera, del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., bajo la dirección del Dr. Antonio Almazán Becerril, perteneciente al Programa de Posgrado en Ciencias del Agua de este Centro.

Atentamente.

Dra. Clelia De la Peña Seaman

Directora de Docencia

Mérida, Yucatán, México, a 17 de julio de 2019.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por las becas otorgadas para la realización de esta investigación (Número de becario 619232), sin ellas no habría sido posible llegar hasta aquí.

Al posgrado en Ciencias del Agua del Centro de Investigación Científica de Yucatán, por las enseñanzas y experiencias vividas.

A los laboratorios de Ecología Costera y Calidad del Agua de la Unidad de Ciencias del Agua, a los laboratorios de FICOTOX y Ecología de Lagunas Costeras del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada y al Centro Universitario de Investigaciones Oceanológicas de la Universidad de Colima por el espacio y los materiales proporcionados para desarrollar este proyecto.

A los miembros de mi comité:

Dr. Antonio Almazán Becerril, por asumir esta responsabilidad inesperada y por todo el tiempo dedicado a este proyecto, su paciencia y enseñanzas, han sido de gran valor académico y personal.

Dr. Aramis Olivos Ortiz, por los consejos y sugerencias, por estar al pendiente a pesar de la distancia y ser la parte optimista de este equipo.

Dr. Ernesto García Mendoza, por el apoyo en los momentos de crisis, sin su apoyo e intervención habría sido difícil dibujar un nuevo panorama.

Dr. Jesús Alvarado Flores, por todas las sugerencias y comentarios a lo largo de este trabajo.

Dr. Eduardo Cejudo Espinoza, sin duda las observaciones realizadas ayudaron a fortalecer este trabajo.

A los técnicos de la Unidad de Ciencias del Agua, especialmente al M. en C. Benjamín Delgado Pech por los consejos, orientación y apoyo en campo y a la Quím. Daniela Ortega Camacho por el apoyo para la elaboración de reactivos.

A la M. en C. Alfrancis Teresa Arredondo Chávez por el apoyo en las salidas de campo, por ayudar a que el trabajo también fuese divertido.

A la Dra. Laura Hernández Terrones, por estar al pendiente a pesar de las circunstancias y brindarme su apoyo y consejos cuando más lo necesité.

A los técnicos M.C. Ramón Murillo Martínez, M.C. Martín Efraín de la Cruz Orozco y M.C. Uriel Mirabal Gómez del CICESE y a Eric Joal García Nava de la Universidad de Colima por el apoyo en el análisis de las muestras.

A los propietarios y/o encargados de los cenotes por brindarnos el acceso a los predios.

Adonis y Jorge por darme hospedaje durante mis estancias en Ensenada y Manzanillo, estaré eternamente agradecida.

A PEIL por todo el apoyo cuando decidí emprender este viaje, por la comprensión y las facilidades que sin duda dieron pie para poder lograr esta meta.

A Paola, por siempre estar a pesar de la distancia, por ser la hermana que la vida me dejó escoger.

A “los chidos del CICY”, ustedes saben que fueron, son y serán parte medular de esta experiencia, los llevo en mi corazón junto a todos los recuerdos generados a lo largo de estos años. Especialmente a quienes estuvieron en los momentos de crisis: Jenni, Juan Carlos, Luis y Javier, por escucharme y animarme en todo momento.

DEDICATORIA

A mi familia, especialmente mis padres y mi hermano, por escucharme, animarme y no dejarme sola, son los cimientos que me mantienen de pie y las alas que me impulsan a volar cada vez más alto.

Contenido

RESUMEN	1
ABSTRACT	3
1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. ANTECEDENTES	8
2.1. Potencial de eutrofización en los cenotes de la Península de Yucatán..	8
2.2. Nutrientes	10
2.3. Fitoplancton	12
2.4. Eutrofización.....	17
3. JUSTIFICACIÓN	20
4. HIPÓTESIS.....	20
5. OBJETIVOS	20
5.1. Objetivo general	20
5.2. Objetivos particulares	21
6. METODOLOGÍA.....	21
6.1. Determinación de sitios de muestreo	21
6.2. Descripción del área de estudio	21
6.3. Estrategia de muestreo	26
6.4. Caracterización hidrológica	27
6.5. Determinación de la abundancia de fitoplancton	28
6.6. Determinación de la concentración de nutrientes	28

6.7.	Estimación de la concentración de pigmentos.....	30
6.8.	Análisis quimiotaxonómico	31
6.9.	Análisis de datos	33
6.10.	Índices tróficos.....	33
7.	RESULTADOS	35
7.1.	Hidrología	36
7.2.	Nutrientes	37
7.3.	Abundancia de fitoplancton	43
7.4.	Pigmentos fotosintéticos.....	48
7.5.	Índices de Estado Trófico	54
8.	DISCUSIÓN.....	57
8.1.	Hidrología	57
8.2.	Nutrientes	60
8.3.	Fitoplancton	62
8.4.	Índices tróficos.....	67
8.5.	Discusión general	70
9.	CONCLUSIONES.....	72
10.	REFERENCIAS	74
ANEXOS.....		84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sitios de estudio, agrupados por zonas.....	23
Figura 2. Cenote Ucil, perfiles de temperatura (A), Conductividad (B), Oxígeno Disuelto (C) y pH (D) en temporada de nortes (línea negra), secas (línea punteada azul) y lluvias (línea roja).....	38
Figura 3. Cenote Mumundzonot, perfiles de temperatura (A), Conductividad (B), Oxígeno Disuelto (C) y pH (D) en temporada de nortes (línea negra), secas (línea punteada azul) y lluvias (línea roja).	39
Figura 4. Cenote X-Azul, perfiles de temperatura (A), Conductividad (B), Oxígeno Disuelto (C) y pH (D) en temporada de nortes (línea negra), secas (línea punteada azul) y lluvias (línea roja).	40
Figura 5. Cenote Lukunchán, perfiles de temperatura (A), Conductividad (B), Oxígeno Disuelto (C) y pH (D) en la temporada de nortes (línea negra), secas (línea punteada azul) y lluvias (línea roja).....	41
Figura 6. Cenote del Rancho San Miguel, perfiles de temperatura (A), Conductividad (B), Oxígeno Disuelto (C) y pH (D) en la temporada de nortes (línea negra), secas (línea punteada azul) y lluvias (línea roja).....	43
Figura 7. Cenote del rancho X-Labón Subín, perfiles de temperatura (A), Conductividad (B) y Oxígeno Disuelto (C) en la temporada de nortes.	44
Figura 8. Cenote Noh Mozón, perfiles de temperatura (A), Conductividad (B), Oxígeno Disuelto (C) y pH (D) en temporada de nortes (línea negra), secas (línea punteada azul) y lluvias (línea roja).....	45
Figura 9. Cenote Nayáh, perfiles de temperatura (A), Conductividad (B), Oxígeno Disuelto (C) y pH (D) en temporada de nortes (línea negra), secas (línea punteada azul) y lluvias (línea roja).	46
Figura 10. Cenote Suhén, perfiles de temperatura (A), Conductividad (B), Oxígeno Disuelto (C) y pH (D) en temporada de nortes (línea negra), secas (línea punteada azul) y lluvias (línea roja).....	47

Figura 11. Concentración media ($\pm$ DE) de las distintas especies de N y P de los cenotes por zona considerando las tres temporadas. a) Nitrógeno Total, Nitrógeno Inorgánico y Nitrógeno Orgánico y b) Fósforo Total, Fósforo Reactivo Soluble y Fósforo orgánico.	38
Figura 12. Concentración media ($\pm$ DE) de las distintas especies de N y P en cada cenote. La zona A en negro, zona B gris claro y zona C gris oscuro. Las barras con (*) corresponden a sitios en los que sólo se obtuvo una medición.	39
Figura 13. Concentración de nitrógeno total (N_T) y fósforo total (P_T) y sus respectivas fracciones orgánica e inorgánica dividido por zonas. Zona A (A, B), zona B (C,D), zona C (E,F).....	42
Figura 14. Abundancia total de fitoplancton en células por litro y colonias por litro en escala logarítmica. Ambas medidas son excluyentes, esto es, las células de las colonias no se contabilizaron individualmente, y en la abundancia presentada como cel·L ⁻¹ no se tomaron en cuenta las células de las colonias.	44
Figura 15. Abundancia total por grupo de fitoplancton en escala logarítmica, A) Diatomeas, B) Clorofitas, C) Criptofitas, D) Dinoflagelados, E) Cianobacterias (cel·L ⁻¹) y F) Cianobacterias coloniales (col·L ⁻¹). (*) Única medición de la temporada de nortes. Zona A en color negro, zona B gris claro y zona C gris oscuro.....	45
Figura 16. Concentración de Chl a (media $\pm$ DE) en los cenotes muestreados, a) agrupados por zonas y b) por temporadas dentro de cada zona.	50
Figura 17. Contribución de cada grupo fitoplanctónico a la concentración total de Chl a. A) Criptofitas, B) Clorofitas, C) Cianobacterias y D) Diatomeas.....	51
Figura 18. Proporción de grupos fitoplanctónicos por cenote y por temporada (izquierda) y abundancia relativa por cenote y por temporada dentro de cada zona. A y B zona A, C y D zona B, E y F zona C. Los cenotes UCL (zona A) y NYH (zona C) solo tuvieron presencia de Chl a en los cromatogramas, por lo que se asume que están compuestos por diatomeas en su totalidad.	53
Figura 19. Regresión lineal de la clorofila vs N_{Org}/N_T	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Densidad de fitoplancton y abundancia relativa por grupos principales en cenotes de Yucatán. Se anexan datos de otros estudios.	14
Tabla 2. Coordenadas de localización de los cenotes agrupados por zona (Grados decimales).....	23
Tabla 3. Detalle de las actividades de campo.	27
Tabla 4. Valores para los índices de estado trófico de Carlson tomado de Kratzer & Brezonik (1981) y rango de concentraciones propuestos por la OECD para cada estado trófico.....	34
Tabla 5. Características generales de los cenotes.	35
Tabla 6. Resumen de resultados (media y desviación estándar) de los parámetros hidrológicos medidos en los primeros tres metros de profundidad.	48
Tabla 7. Resumen de resultados (media y desviación estándar) de las concentraciones de nutrientes de cada cenote durante las tres temporadas muestreadas.....	43
Tabla 8. Abundancia total de los cenotes en $\text{cel}\cdot\text{L}^{-1}$ y $\text{col}\cdot\text{L}^{-1}$, y abundancia relativa por grupos obtenida mediante análisis quimiotaxonómico.	47
Tabla 9. Matriz de concentración de pigmentos fotosintéticos usados para la identificación con CHEMTAX.....	48
Tabla 10. Escala de color para la señalización del estado trófico.	54
Tabla 11. Estado trófico de los cenotes estudiados estimado mediante el TSI de Carlson, para clorofila y fósforo total durante la temporada de nortes, lluvias y secas. Celdas vacías sin disponibilidad de datos.....	55
Tabla 12. Estado trófico de los cenotes, con base en los valores dados por la OECD para la concentración de clorofila y fósforo total para las tres temporadas analizadas.	56
Tabla 13. Concentración de NO_x y PRS ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) encontrada en agua subterránea de la PY.	61

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo determinar el estado trófico de once cenotes localizados en tres zonas del estado de Yucatán. En la zona A localizada en los municipios de Cenotillo y Tunkas se muestrearon los cenotes Ucil, Mumundzonot, Lukunchán y X-Azul. En la zona B, localizada en la zona ganadera del municipio de Dzilam de Bravo se tomaron datos en los cenotes de los ranchos X-Labón Subín (2), San Miguel y Buena Esperanza, y en la zona C ubicada en el municipio de Tecoh, se analizaron muestras de los cenotes de uso turístico Nayáh, Noh Mozón y Suhén. Para ello, se evaluó la variación temporal de sus características hidrológicas (OD, CE, pH y temperatura), las concentraciones de nutrientes y su asociación con los principales grupos de fitoplancton. Se utilizaron los índices tróficos propuestos por Carlson y la OECD basados en la concentración de clorofila *a* y fósforo total. Los resultados mostraron una marcada estacionalidad de los parámetros hidrológicos, controlados principalmente por las variaciones estacionales de temperatura y precipitación. En términos generales las formas oxidadas de nitrógeno (nitratos+nitritos) fueron las especies químicas de nitrógeno más abundante ($2.75\text{-}274.08\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$), aunque en la zona B fue el nitrógeno orgánico el que presentó la mayor concentración. El fósforo total varió de 0.60 a $41.10\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ con la concentración máxima en el cenote Buena Esperanza de la zona B, que fue el único que se encontró limitado por nitrógeno ($\text{N:P}=5.3$). La concentración de clorofila varió de 0.001 a $48.39\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, con las menores concentraciones asociadas a las zonas A y C, mientras que en la zona B se registraron los valores máximos. La comunidad de fitoplancton fue heterogénea, y en general, en los cenotes de baja concentración de Chl *a* dominaron las diatomeas, en los de concentración intermedia las criptofitas y clorofitas tuvieron mayor relevancia alcanzando porcentajes entre 50-70%. Finalmente, los cenotes de la zona B, con alta concentración de clorofila las comunidades de fitoplancton estuvieron constituidas por cianobacterias en proporciones del 50-98%. Los resultados de los índices basados en clorofila mostraron una amplia variación espacio-temporal del estado trófico. Dentro de la zona A se encontraron dos tendencias, por una parte, los cenotes Ucil y Mumundzonot resultaron ser

ultraoligotróficos y los cenotes X-Azul y Lukunchán presentaron una tendencia a la eutrofización. En la zona B los cenotes resultaron eutróficos, excepto X-Labón Subín que a pesar de tener una alta concentración de nutrientes presentó baja biomasa de fitoplancton. Finalmente, los cenotes de la zona C variaron entre ultraoligotrófico y oligotrófico. Por el contrario, las estimaciones hechas con la concentración de fósforo total muestran que los cenotes se encuentran entre eutróficos a hipereutróficos, especialmente durante la temporada de lluvias. Estos resultados muestran una amplia variabilidad espacial y estacional en las concentraciones de clorofila y nutrientes y resaltan la vulnerabilidad de estos cuerpos de agua. En particular, en la zona A hay tendencia a alejarse de la oligotrofia, en la zona B los cenotes están eutrofizados y presentan florecimientos permanentes de microalgas potencialmente tóxicas como los géneros *Microcystis* y *Anabaena*, y en la zona C se encuentran las mejores condiciones, aunque con un riesgo potencial debido a la alta concentración de nitrógeno.

ABSTRACT

The aim of this work was to determine the trophic state of eleven cenotes located in three zones of the state of Yucatan. In zone A, located in the municipalities of Cenotillo and Tunkas were sampled the cenotes Ucil, Mumundzonot, Lukunchán and X-Azul. In zone B, located in the cattle area of the municipality of Dzilam de Bravo, data were taken from the cenotes of the ranches X-Labón Subín (2), San Miguel and Buena Esperanza, finally, in zone C, located in the municipality of Tecoh were analyzed samples from the cenotes of tourist use Nayáh, Noh Mozón and Suhén. Temporal variation of hydrological characteristics (OD, EC, pH and temperature), nutrient concentrations and their association with the main phytoplankton groups was evaluated. The trophic indices proposed by Carlson and OECD based on the concentration of chlorophyll a and total phosphorus were used. The results showed a marked seasonality of the hydrological parameters, controlled mainly by the seasonal variations of temperature and precipitation. In general, oxidized forms of nitrogen (nitrates+nitrites) were most abundant chemical species of nitrogen ($2.75\text{--}274.08\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$), although, in zone B organic nitrogen presented highest concentration. The total phosphorus varied from 0.60 to $41.10\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ with the maximum concentration in the cenote Buena Esperanza of zone B, which was the only one limited by nitrogen ($\text{N:P}=5.3$). Chlorophyll concentration varied from 0.001 to $48.39\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, lowest concentrations were associated to zones A and C, while in zone B the maximum values were detected. Phytoplankton community was heterogeneous, and, in general, in the cenotes of low chlorophyll concentration diatoms were dominant, in those of intermediate chlorophyll concentration the cryptophytes and chlorophytes had higher relevance, reaching percentages between 50-70%. Finally, in the cenotes of zone B, with highest chlorophyll concentration, the phytoplankton communities were constituted by cyanobacteria in proportions of 50-98%. Results of the chlorophyll-based indices showed a wide spatio-temporal variation of the trophic state. Within Zone A, two trends were found: on the one hand the Ucil and Mumundzonot cenotes turned out to be ultra-oligotrophic, and on the other hand the Cenotes X-Azul and Lukunchán showed a trend to eutrophication. In zone B, the cenotes were eutrophic, except X-Labón

Subín, which, despite having a high nutrients concentration, had low phytoplankton biomass. Finally, the cenotes of zone C varied between ultra-oligotrophic and oligotrophic. In contrast, estimates made with total phosphorus concentration showed that the trophic status of the cenotes vary between eutrophic and hypereutrophic, especially during rainy season. These results show a wide spatial and seasonal variability in chlorophyll and nutrient concentrations and highlight the vulnerability of these bodies of water. In particular, in zone A there is a trend to move away from oligotrophy, in zone B the cenotes are eutrophized and present permanent blooms of potentially toxic microalgae such as *Microcystis* and *Anabaena*, and in zone C the best conditions are found, although with a potential risk due to the high concentration of nitrogen.

1. INTRODUCCIÓN

En la Península de Yucatán el recurso hídrico disponible proviene del agua subterránea almacenada en el acuífero (Bauer-Gottwein *et al.*, 2011), que debido a sus características kársticas presenta dolinas, localmente conocidas como cenotes. Estas estructuras geológicas se forman como resultado de la disolución de la roca caliza por efecto de la percolación de lluvia cargada con CO₂ (Schmitter-Soto *et al.*, 2002) o por los cambios en la haloclina debido a la intrusión salina (Beddows *et al.*, 2007). El acuífero de la Península de Yucatán alberga grandes cantidades de agua que mantienen ecosistemas altamente diversos que dependen del agua subterránea (Bauer-Gottwein *et al.*, 2011). Sin embargo, la alta permeabilidad de la roca, en combinación con la falta de suelo desarrollado que actúe como filtro, hacen que el acuífero sea vulnerable a la contaminación (Marín & Perry, 1994).

Entre las sustancias con alto potencial de causar una drástica disminución en la calidad del agua del acuífero se pueden mencionar los metales pesados, los compuestos orgánicos y los agroquímicos, entre otros (Marín *et al.* 2000; Pacheco *et al.*, 2000; Batllori, 2016; Rendón, 2016). Los contaminantes pueden llegar al agua subterránea por diversas vías, como la percolación desde la superficie terrestre, la entrada directa a través de pozos o dolinas, o mediante el flujo de agua contaminada o salina hacia el acuífero como resultado del bombeo de pozos (Alley, 2011). La materia orgánica también tiene un papel importante en los procesos ecológicos de los cenotes ya que pueden degradarse por acción bacteriana a formas simples de nitrógeno y carbono (CO₂, NH₄, NO₃, NO₂), que pueden ser asimilados fácilmente por los productores primarios para formar biomasa. Si la concentración de nutrientes se incrementa debido al incremento de la carga de materia orgánica externa, de existir las condiciones adecuadas, también se incrementarán las concentraciones de biomasa de los productores primarios en el sistema, en particular, del fitoplancton.

El efecto más evidente de esta alteración es la eutrofización de estos cuerpos de agua, y con ello, la disminución de la calidad del agua para consumo humano y

para otros usos agrícolas o pecuarios (Sutton *et al.*, 2013; Pajeres, 2016). La eutrofización puede ocasionar en casos extremos anoxia y con ello, mortandades masivas de organismos, llegando al colapso del sistema, (Richardson & Jorgensen, 1996). Debido a la correlación que existe entre la concentración de nutrientes y la producción primaria (Nixon, 1995; Richardson & Jorgensen, 1996; Glibert, 2016), la concentración de nutrientes puede utilizarse como un indicador de eutrofización y con base en ello los ecosistemas pueden clasificarse en oligotróficos, mesotróficos y eutróficos, ya sea que reciban poca, intermedia o grandes cantidades de nutrientes (Smith *et al.*, 1998).

En términos de eutrofización, no solo las concentraciones de los nutrientes son importantes, sino también las relaciones estequiométricas que se generan por la disponibilidad nitrógeno y fósforo, dos elementos potencialmente limitantes que funcionan como controladores del estado trófico en cuerpos de agua. El ingreso estacional de los aportes terrígenos promueve un incremento en la producción orgánica del sistema pues los organismos autótrofos asimilan los compuestos nitrogenados y fosfatados para convertir el CO₂ en biomasa (Pepper *et al.*, 2007).

La contaminación del agua subterránea comúnmente se da como resultado de las actividades humanas, en dónde sustancias contaminantes de origen municipal, industrial o agrícola, se infiltran dentro de la zona no saturada y se dispersan en el acuífero, incrementando la carga de nutrientes y dando paso al crecimiento de organismos acuáticos no deseados (Muralikrishna *et al.*, 2017), como es el caso de los Florecimientos Algales Nocivos (FAN), que pueden producir daños a la salud y al ecosistema debido a la presencia de organismos tóxicos y a la interferencia en el crecimiento de otros organismos respectivamente. Los FAN se han expandido en las últimas décadas alrededor del mundo, en todo tipo de aguas, marinas y continentales como resultado del incremento en la tasa de aporte de nutrientes (Glibert *et al.*, 2018), en otras palabras, al proceso de eutrofización, poniendo en riesgo la viabilidad de las mismas actividades productivas que los generan. Dentro de los grupos de fitoplancton que forman floraciones densas en

lagos eutróficos destacan diatomeas, cianobacterias y dinoflagelados (Bellinger & Sigee, 2010).

En la Península de Yucatán se han reportado cenotes con estado oligotrófico, mesotrófico y eutrófico con base en su concentración de clorofila *a* (Schmitter-Soto *et al.*, 2002), esto es importante considerando que las principales fuentes continentales de nutrientes en el estado de Yucatán son las actividades económicas relacionadas con el turismo, la ganadería y la agricultura principalmente (Aranda-Cirerol *et al.*, 2011), las cuales se desarrollan en los alrededores de los cenotes o afectan el agua subterránea. El aumento de la carga orgánica y de los nutrientes en estos cuerpos de agua puede modificar no sólo la estructura trófica, sino acelerar el proceso de eutrofización y la pérdida irreversible de estos sistemas acuáticos.

Por lo anterior, el presente trabajo pretende evaluar la variación espacio-temporal del estado trófico de cenotes en el norte del estado de Yucatán y su asociación con los principales grupos de fitoplancton, ya que con base en los antecedentes suponemos que una comunidad específica de fitoplancton estará relacionada con el estado trófico de los cenotes estudiados, y a su vez con las variaciones propias de la estacionalidad climática y el efecto de las actividades humanas sobre el estado del ecosistema.

2. ANTECEDENTES

2.1. Potencial de eutrofización en los cenotes de la Península de Yucatán

Al estar conformada por roca caliza, la Península de Yucatán, se encuentra expuesta a la karstificación, proceso por el cual la roca caliza se disuelve, generando colapsos del sustrato y dejando expuestas algunas formaciones propias del karst, como las cuevas inundadas o las dolinas que localmente son conocidas como cenotes (Beddows *et al.*, 2007). Los cenotes pueden tener conexión con el acuífero, y por ende, mantener el intercambio de agua con las zonas adyacentes (Schmitter-Soto *et al.*, 2002), conectándose directamente al flujo subterráneo horizontal que alcanza velocidades de hasta $3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ (Moore *et al.*, 1992) y otros en los que la conexión está restringida o no existe conexión definida con algún flujo horizontal (Schmitter-Soto *et al.*, 2002). En el estado de Yucatán hay registros de la existencia de entre 7000 y 8000 cenotes en 2007 (Beddows *et al.*, 2007), muchos de los cuales se encuentran en sistemas productivos, zonas urbanas y suburbanas, ranchos o plantíos (Sosa-Escalante & Chablé-Santos, 2013). Por su morfología los cenotes se han clasificado en cuatro categorías: (1) en forma de cántaro con una abertura exterior pequeña en relación con el embalse, (2) abierto con paredes verticales, (3) en forma de aguada azolvado y (4) en forma de caverna, con acceso lateral (Hall, 1936).

Las características hidrológicas de la Península de Yucatán están dadas principalmente por la precipitación, la variabilidad climática, las condiciones geográficas y geológicas (Pérez *et al.*, 2011). La temperatura superficial en los cenotes oscila entre 22-33.5 °C con valores similares a la temperatura del aire (Schmitter-Soto, *et al.*, 2002), los valores más altos a nivel superficial se presentan durante las temporadas de secas y lluvias (Alcocer *et al.*, 1998; Díaz-Arce *et al.*, 2001; Cervantes-Martínez *et al.*, 2009). La conductividad eléctrica (CE) es variable, con valores que van de $42.5 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ hasta $7390 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ (Schmitter-Soto, *et al.*, 2002), los altos valores se encuentran asociados a la disolución de la roca, que permite la entrada de agua subterránea y minerales (Cervantes-Martínez *et al.*,

2017), así como a las zonas cercanas a la costa, debido a la entrada de agua de mar (Cervantes-Martínez *et al.*, 2002; Cervantes-Martínez *et al.*, 2009), mientras que la variación estacional de la CE está dada por la precipitación (Pérez *et al.*, 2011).

El agua de los cenotes suele estar subsaturada en oxígeno disuelto (<50%) debido al consumo de este elemento en procesos asociados a la respiración y la oxidación de la materia orgánica (Alcocer *et al.*, 1998). La concentración en superficie es mayor, con una variación de $0.64 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ a $16 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Díaz-Arce *et al.*, 2001; Schmitter-Soto *et al.*, 2002), que disminuye gradualmente con la profundidad. El incremento de la concentración de OD en superficie, se debe al intercambio con el aire y a fotosíntesis del fitoplancton (Alcocer *et al.*, 1998; Díaz-Arce *et al.*, 2001). En general, la temperatura, el oxígeno disuelto y la conductividad eléctrica presentan estratificación durante las temporadas de secas y lluvias (Díaz-Arce *et al.*, 2001; Cervantes-Martínez *et al.*, 2002), en estos cenotes la posición de la termoclina varía dependiendo de la morfometría del sitio, las condiciones meteorológicas, la vegetación circundante, la hidrología y la penetración de la luz (Pérez *et al.*, 2011). En cambio, en la temporada de nortes los perfiles son homogéneos debido al efecto de mezcla provocado por los vientos característicos de esta temporada (Cervantes-Martínez *et al.*, 2009), aunque esto depende de la profundidad de cada cenote; en cenotes profundos existe cierta estratificación que no se abate por el efecto del esfuerzo del viento en superficie.

Por ello, debido al régimen de mezcla que presentan, los cenotes son clasificados como holomícticos y meromícticos (Schmitter-Soto *et al.*, 2002; Torres-Talamante *et al.*, 2011). Los cenotes holomícticos presentan perfiles homogéneos de sus parámetros fisicoquímicos, mientras que los meromícticos se encuentran parcial o totalmente sin mezcla (Zadereev *et al.*, 2017), en muchos casos producto de la intrusión salina (Schmitter-Soto *et al.*, 2002).

Las características geológicas de la Península de Yucatán como la alta permeabilidad de la matriz rocosa, sumado a la falta de filtración ocasionada por la ausencia de suelo, hacen al acuífero vulnerable a la contaminación (Marín & Perry, 1994). Los problemas de calidad del agua subterránea surgen principalmente de la descarga de aguas residuales provenientes de los núcleos de población. En ausencia de ríos, las aguas residuales se inyectan principalmente en el acuífero o se descargan en cenotes (Bauer-Gottwein *et al.*, 2011), incrementando la carga de nutrientes en el acuífero, lo que coincide con las fuentes de nitrato identificadas por Pacheco *et al.* (2000) al sur de Yucatán: fertilizantes ricos en nitrógeno y una contribución menor de desechos no tratados de origen domésticos y de distintas granjas de animales de encierro.

2.2. Nutrientes

Los principales elementos implicados en el crecimiento del fitoplancton son nitrógeno, fósforo, hierro y otros elementos utilizados en cantidades traza (Reynolds, 2006). El fósforo es necesario para la transferencia de energía (ATP) y para el ensamble de las moléculas de ADN y el ARN, y el nitrógeno para la síntesis de proteínas. Estos procesos son fundamentales para el crecimiento de las plantas acuáticas y por lo tanto, también lo son para el mantenimiento de la funcionalidad de los sistemas acuáticos (Conley *et al.*, 2009). En el acuífero de la Península de Yucatán existe una relación entre la variación de las concentraciones de nutrientes inorgánicos disueltos con la estacionalidad climática (Pacheco & Cabrera, 1997; Pacheco *et al.*, 2000; Hernández-Terrones *et al.*, 2015), en donde se ha observado una respuesta al nivel de precipitación, con bajas concentraciones debido al efecto de dilución por la infiltración de agua de lluvia que se mezcla con aguas subterráneas, y las concentraciones más altas en temporada de secas, asociadas a la disminución en la precipitación (Cervantes-Martínez *et al.*, 2002). Además, los sitios que reciben un flujo constante de agua subterránea también suelen tener concentraciones más bajas de nutrientes (Schmitter-Soto *et al.*, 2002).

Diversos estudios demuestran que el nutriente más abundante en los cuerpos de agua de la Península de Yucatán es el nitrógeno en forma de nitrato (NO_3^-) (Hernández-Terrones *et al.*, 2010; Herrera-Silveira, 1999; Pacheco & Cabrera, 1997). Dentro de las posibles fuentes de nitrógeno se encuentran aguas residuales domesticas no tratadas y el uso de fertilizantes ricos en nitrógeno (Pacheco *et al.*, 2000). Las concentraciones en pozos creados artificialmente para uso consuntivo son más altas que en cenotes; por ejemplo, en el norte de la Península de Yucatán, Pacheco & Cabrera (1997) encontraron que la concentración de nitratos en pozos es menor a $161 \mu\text{M}$ en partes inhabitadas, mientras que en áreas densamente pobladas la concentración puede ser mayor a $725.8 \mu\text{M}$. Por su parte, Hernández-Terrones *et al.*, (2011) encontraron una concentración media de $353.3 \mu\text{M}$ de nitrógeno total (N_T) en pozos en Puerto Morelos, Quintana Roo. Mientras que en cenotes la concentración de nitratos varía de $0.52 \mu\text{M}$ a $500 \mu\text{M}$ (Schmitter-Soto *et al.*, 2002).

Algunos estudios realizados en pozos de extracción han encontrado que las altas concentraciones de nitrógeno en la Península de Yucatán, están asociadas al uso de fertilizantes, desechos no tratados de origen domésticos y pecuario, además de que incrementan en la temporada de lluvias y disminuyen durante la temporada de secas (Pacheco & Cabrera, 1997; Pacheco *et al.*, 2000).

Con respecto a la presencia de fósforo, éste se encuentra en muy bajas concentraciones en el acuífero debido a que la saturación del agua con carbonatos favorece su coprecipitación con el calcio (Alcocer *et al.*, 1998; Cervantes-Martínez *et al.*, 2002; Schmitter-Soto *et al.*, 2002; Hernández-Terrones *et al.*, 2010). Las concentraciones varían de 0.005 a $20 \mu\text{M}$ (Cervantes-Martínez *et al.*, 2002; Schmitter-Soto *et al.*, 2002), con variaciones estacionales no significativas.

La relación N:P es mayor a la relación de Redfield (16:1), debido a las bajas concentraciones de fósforo que contrastan con las altas concentraciones de nitrógeno, lo que sugiere una limitación en el sistema, en diferentes grados, por

fósforo (N:P=31.4-5400) (Alcocer *et al.*, 1998; Cervantes-Martínez *et al.*, 2002; Hernández-Terrones *et al.*, 2010).

2.3. Fitoplancton

La comunidad de fitoplancton responde rápidamente a las variaciones físicas y químicas del ambiente, modificando su biomasa y composición taxonómica, de tal forma que la estructura de la comunidad de fitoplancton es indicadora del estado del sistema acuático (Bellinger & Sigeo, 2010).

En los cenotes de la PY existen pocos reportes sobre la diversidad de fitoplancton, de acuerdo a los datos recopilados por Schmitter-Soto *et al.* (2002), se han identificado cerca de 150 especies, dominado por tres grupos: clorofitas, cianobacterias y diatomeas. Las diatomeas son el grupo con mayor diversidad, en el que las especies más frecuentes fueron *Achnanthes gibberula*, *Amphora ventricosa*, *Cocconeis placentula* y *Gomphonema lanceolatum*. En las algas verdes el género dominante es *Monoraphidium*, y en las cianofitas dominan *Aphanocapsa*, *Chroococcus* y *Microcystis* (Esquivel, 1991; Herrera-Silveira *et al.*, 1998; López-Adrián & Herrera-Silveira, 1994; López-Adrián *et al.*, 1993; Sánchez-Molina, 1985).

Uno de los primeros reportes para la Península de Yucatán relacionados con la diversidad fitoplanctónica es el de López-Adrián & Herrera-Silveira (1994), quienes evaluaron la composición del plancton en el cenote Xtogil en Yucatán, en dónde el grupo dominante fueron clorofitas de los géneros *Coelastrum*, *Microspora* y *Scenedesmus*; seguidas de las bacilariofitas *Synedra*, *Cyclotella* y *Navicula*, y finalmente dentro de las cianobacterias, dominaron *Microcystis*, *Anabaena*, *Nostoc*, *Trichodesmium* y *Merismopedia*. Por su parte, Herrera-Silveira *et al.* (1998) encontraron que las diatomeas pennadas fueron más abundantes que las especies céntricas en los sitios abiertos, mientras que en los sistemas con mayor

concentración de nutrientes las cianobacterias y clorococales son los grupos más abundantes.

Sánchez *et al.* (2002), realizaron un estudio para determinar la composición de especies de fitoplancton en cenotes y cuevas en la zona costera del estado de Quintana Roo, contrastando dos temporadas climáticas: secas y lluvias. Ellos identificaron un total de 79 especies, con mayor diversidad de especies en los cenotes (78 especies) que en las cuevas (40 especies), estas especies corresponden a cuatro grupos de fitoplancton cromofitas, cianofitas, clorofitas y euglenofitas, de mayor a menor número de especies identificadas, además se identificaron 68 especies en la temporada de secas y 71 en la temporada de lluvias.

Lopez-Adrián & Barrientos-Medina (2005), analizaron la composición del fitoplancton en diez cenotes y dos lagunas interiores en la PY, en los que encontraron 98 especies, siendo los grupos más diversos las clorofitas (36 especies) y las crisofitas (35 especies). Las especies con mayor distribución fueron *Microcystis aeruginosa*, *Synedra ulna*, *Dictyosphaerium pulchellum*, *Gomphosphaeria aponina* y *Microcystis protocystis*. Chen-Há fue el cenote con mayor diversidad (24 spp.) e Ixin-Há el de menor diversidad con tres especies. En este mismo sitio (Ixín-Há), Díaz-Arce *et al.* (2001) determinaron la abundancia de fitoplancton, en el que durante la temporada de secas se registró la mayor abundancia ($2.5 \times 10^7 \text{ cel} \cdot \text{L}^{-1}$), que corresponde a una concentración de $95 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ de clorofila.

Las abundancias de fitoplancton reportadas en cenotes oscilan de $10^2 \text{ cel} \cdot \text{L}^{-1}$ hasta $10^8 \text{ cel} \cdot \text{L}^{-1}$ (Tabla 1). En los cenotes en los que se ha estudiado la variación temporal, se encontró que las abundancias más elevadas se registran durante la temporada de secas y lluvias (López-Adrián & Herrera-Silveira, 1994; Díaz-Arce *et al.*, 2001).

Tabla 1. Densidad de fitoplancton y abundancia relativa por grupos principales en cenotes de Yucatán. Se anexan datos de otros estudios.

Ref.	Cenote	Temporada	Chl a ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Densidad ($\text{cel} \cdot \text{L}^{-1}$)	Baci (%)	Ciano (%)	Cloro (%)	Cripto (%)	Criso (%)
1	Nohoch Hol	Nortes		4.80×10^5	3.80	0.2	96		
		Lluvias	<1		1.60	92.8	0.08	0.2	5.2
2	Xlaká	Nortes	<1	5.90×10^6	4.80	83.5	0.7	0.5	10.5
		Secas	9	2.50×10^7	0.80	80	5.7	10.5	2.7
2	Ixinha	Lluvias	9.5		0.06	66.7	31.71	1.08	0.45
		Nortes	2.5	1.60×10^7	0.66	82.69	12.55	2.02	2.08
		Secas	95	7.90×10^8	0.01	99.7	0.06	0.03	0.12
3	Xtogil	12 meses		$1.9 \times 10^4 - 10 \times 10^6$	79.00	5.3	13.2	1.3	
4	Box Dzonot	Secas	2	2.45×10^7					
4	XS verde	Secas	49.3	4.60×10^9		>99			
4	XS	Secas	1.8	1.40×10^7		95			
		Lluvias	3.6	3.00×10^8					
		Secas	1.3						
4	San Miguel	Lluvias	66.9			90			
		Nortes	1.10			75			
4	Yaxputol	Secas	3.50	3.50×10^6					
		Lluvias	6.80	8.50×10^7					
		Nortes	2.70	3.50×10^6					
4	Chinkila Aguil	Secas	0.01	2.00×10^3					
		Secas	0.15	1.00×10^3					
4	Chalcuch	Lluvias	0.15	3.60×10^5					
		Nortes	0.01	2.70×10^4					
4	Tanimax	Secas	0.07	2.00×10^3					
		Lluvias	0.07	2.00×10^4					
4	Ucil	Lluvias	0.01	1.59×10^5					
		Nortes	0.03	2.00×10^5					

4	Mumundzonot	Lluvias	0.03	1.10x10 ⁴	
		Nortes	0.10	5.80x10 ⁴	
4	X-Azul	Lluvias	0.84	1.09x10 ⁷	
		Nortes	0.95	3.00x10 ⁵	
4	Lukunchan	Lluvias	1.07	1.30x10 ⁴	
4	Noh Uzil	Lluvias	8.80	5.00x10 ⁷	
4	Villa 56	Lluvias		3.30x10 ⁴	
		Nortes		5.00x10 ³	
4	Pishton Uzil	Lluvias	4.90	7.00x10 ⁸	
4	Noh Mozón	Secas	0.49		
		Lluvias	0.39		
4		Nortes	0.37		
4	Utzil-Tekit	Lluvias	0.01	1.26x10 ⁸	
		Nortes	0.02	3.00x10 ⁴	
4	Teabo	Secas	0.03		
		Lluvias	0.03		
		Nortes	0.03		
4	Chonkila	Secas	2.40		
4	Chichi de los lagos	Lluvias	2.90	3.25x10 ⁶	
4	Yakman	Secas	0.28	1.00x10 ⁴	
4	Chich	Secas	0.01	1.00x10 ³	
5	Leona Vicario**	Nortes	3	4.88x10 ⁷	62
5	La Mojarra**	Nortes	9.3		92
6	Noh Mozón	Lluvias		3.00x10 ¹	100.00
6	Mumundzonot	Lluvias		2.00x10 ¹	100.00

**Quintana Roo, Referencias: 1=Torres-Talamante *et al.*, 2011, 2=Díaz-Arce *et al.*, 2001, 3=López-Adrián & Herrera-Silveira, 1994, 4=Hernández-Terrones *et al.*, 2011, 5=Villafeñe *et al.*, 2014, 6=Irola-Sansores *et al.*, 2014.

Herrera-Silveira *et al.* (1998) encontraron una variación en las concentraciones de clorofila *a* en los cuerpos de agua de la Península de Yucatán, con altas concentraciones asociadas los sitios de uso ganadero, y bajas concentraciones en cavernas o sitios subterráneos ($0.11-97.49 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$). Otros estudios han reportado concentraciones más bajas de clorofila, que en algunos casos llega a ser por debajo del límite de detección (Cervantes-Martínez *et al.*, 2002; Cervantes-Martínez *et al.*, 2009; Hernández-Terrones *et al.*, 2011). Las concentraciones más altas se han reportado durante las temporadas de secas y lluvias.

Los productores primarios son importantes en términos ecológicos, puesto que en sitios oligotróficos son los productores primarios fotoautótrofos de los cuáles depende la nutrición del resto de los organismos acuáticos (Reynolds, 2006). Existen algunas especies que pueden causar problemas ecológicos o a la salud, ya sea por proliferación de una sola especie o la aparición de especies tóxicas, ya que interfieren directa o indirectamente con otros organismos alterando su hábitat e impactando negativamente su crecimiento. Estas son conocidas como algas nocivas y sus eventos de proliferación se conocen como Florecimientos Algales Nocivos (FAN) (Glibert *et al.*, 2018), estos usualmente están asociados a cianobacterias y por sus eventos de proliferación y presencia de toxinas son conocidos como cianoHAB. Los cianoHAB pueden producir toxinas hepatotóxicas o neurotóxicas principalmente. En los sistemas dulceacuícolas los géneros más comunes son *Anabaena*, *Microcystis* y *Cylindrospermopsis*, que han desarrollado mecanismos para sobrevivir y reproducirse, aprovechando todos los recursos disponibles (nutrientes orgánicos e inorgánicos) (O'Neil *et al.*, 2012).

Las actividades humanas que generan un incremento en la carga de nutrientes que llega a los cuerpos de agua, sumado a los efectos del cambio climático (incremento en la temperatura y cambio en el régimen de lluvia), facilitan el crecimiento de los cianoHAB (O'Neil *et al.*, 2012). En los últimos años los reportes de FAN han incrementado, esto se atribuye como una consecuencia de la eutrofización, a través

de las actividades humanas que provocan un incremento en la carga de nutrientes que llega a los sistemas acuáticos, resultado de los cambios en las prácticas en la agricultura y la acuicultura, la descarga de aguas residuales y el cambio climático global (Glibert *et al.*, 2010, 2018).

2.4. Eutrofización

Durante años ha habido diversas definiciones del término eutrofización, que en resumen coinciden en que se trata de un proceso de enriquecimiento del agua con nutrientes de origen natural y/o antropogénico que causa a su vez un incremento en la biomasa de los productores primarios y lleva al incremento de carbono orgánico en los sistemas acuáticos (Margalef, 1982; Mee, 1988; Richardson & Jorgensen, 1996; Glibert *et al.*, 2010). En condiciones naturales, el incremento en la biomasa puede ser canalizado a través de consumidores, incrementando su producción en niveles tróficos superiores o exportándola fuera del sistema. Cuando la entrada de nutrientes tiene un fuerte componente antropogénico se denomina eutrofización cultural (Beiras, 2018), que ocasiona la pérdida de la calidad del agua en escalas de tiempo mucho más rápidas que la eutrofización natural, que se presenta en escalas de tiempo geológico. Entre los impactos deletéreos de la eutrofización, está la formación de zonas anóxicas o hipóxicas, generando la producción de gases tóxicos y de efecto invernadero por la descomposición de la materia orgánica (Smith & Schindler, 2009) además de producir la muerte de organismos, que a su vez, puede reducir la diversidad de los sitios impactados. Incluso se estima que el incremento en la eutrofización de lagos y embalses por la entrada de altas concentraciones de nitrógeno y fósforo aumentará las emisiones de metano entre un 30 a 90% durante el siglo XXI (Beaulieu *et al.*, 2019).

Los indicadores ecológicos para la clasificación trófica de los sistemas de agua dulce se dividen en físicos, químicos y biológicos; estos pueden ser de una sola variable o multiparamétricos (Xu, 2008). Debido a que en los sistemas acuáticos continentales el fósforo es el principal nutriente que controla la

productividad primaria, la determinación del estado trófico construido con base en la concentración de fósforo y/o de clorofila puede ser usado para estimar la biomasa de los productores primarios, ya que ambos están correlacionados (Beiras, 2018). Dentro de los indicadores biológicos, la presencia de cianoHAB también está asociada con la eutrofización, debido a la aparición y dominancia de especies diazotróficas (*Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Cylindrospermopsis*) o no diazotróficas (*Planktothrix* o *Microcystis*) (Istvánovics, 2009).

Uno de los índices más usados para evaluar el estado trófico de los sistemas dulceacuícolas es el Índice de Estado Trófico (TSI por sus siglas en inglés) propuesto por Carlson (1977), que plantea el uso de variables como la transparencia del disco de Secchi, la concentración de clorofila-*a* o la concentración de fósforo total. Existen otros índices que permiten evaluar la calidad del agua, no sólo de la superficie sino a través de la columna de agua, añadiendo la pérdida de oxígeno disuelto en la zona hipolimnética de los lagos (Chapra & Dobson, 1981). Por su parte, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD), propuso una clasificación para evaluar el grado de eutrofia de lagos y embalses mediante el análisis de nutrientes (P), la biomasa (clorofila *a*) y la cantidad de luz disponible para la fotosíntesis (transparencia) (OECD, 1982). Recientemente, se ha planteado el uso de modelos predictivos a corto y largo plazo que involucren distintos escenarios para el cambio climático, la ecofisiología de los organismos acuáticos, la hidrología del sitio y los posibles cambios derivados del cambio de uso de suelo (Glibert *et al.*, 2010).

En la Península de Yucatán se tienen pocos registros sobre el estado trófico de los cenotes, uno de los más amplios es el de Schmitter-Soto *et al.* (2002), quienes determinaron el estado trófico de 30 cenotes en la Península de Yucatán, a partir de la concentración de clorofila-*a* usando el TSI propuesto por Carlson (1977). Los autores reportan tres estados tróficos en los cenotes: oligotrófico, mesotrófico y eutrófico, de los cuales el 15% se encuentra eutrofizado. Otros estudios en cenotes en Quintana Roo encontraron que todos los sitios tenían un estado oligotrófico con

base en la concentración de clorofila (Cervantes-Martínez *et al.*, 2002; 2009; 2017). Por su parte, Villafañe *et al.* (2015), encontraron que los cenotes Leona Vicario y La Mojarra (Quintana Roo) son considerados mesotróficos con concentraciones de clorofila de 3 a 20 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. Respecto a las comunidades de fitoplancton, (López-Adrián & Herrera-Silveira, 1994) encontraron una tendencia a la eutrofización en el cenote Xtogil (Yucatán) debido a los cambios en los índices de diversidad, confirmado por la presencia de grupos encontrados en cuerpos de agua contaminados como *Synedra ulna*, *Cyclotella* sp., *Navicula* sp., *Ankistrodesmus fusiforme*, *Merismopedia minima*, *Anabaena* sp. y *Nemalion* sp. Finalmente, Torres-Talamante *et al.* (2011) clasificaron al cenote Nohoch Hol (Quintana Roo) como ultraoligotrófico, por la baja concentración de nutrientes ($\text{NO}_3=34.8 \mu\text{M}$, $\text{PRS}^1=$ no detectado).

Uno de los estudios más recientes sobre la calidad del agua en el acuífero de la Península de Yucatán es el de Pacheco-Castro *et al.* (2017), quienes realizaron un análisis espacio-temporal de los procesos que gobiernan la calidad del agua dentro del anillo de cenotes y encontraron que la calidad del agua permanece sin variación espacial durante periodos sin eventos anómalos de precipitación. Categorizaron cuatro zonas: (1) el área costera, caracterizada por la intrusión de agua de mar; (2) la zona este con la mejor calidad del agua debido a la alta precipitación; (3) la zona central con mayor concentración de iones (Ca^+ , Mg^{+2} , Cl^- , Na^+ , K^+ y SO_4^{-2}) que la zona central, debido a la disolución de rocas carbonatadas. Estas dos zonas (este y centro), son consideradas con la composición natural del agua subterránea, sin efecto de contaminación por fuentes antropogénicas. Finalmente, (4) dos zonas contaminadas, una al sur de la ciudad de Mérida y la otra al este, debajo de la zona agrícola, ambas caracterizadas por la alta concentración de nitratos, las cuales también las podríamos considerar con el máximo potencial de eutrofización.

¹ Fósforo Reactivo Soluble (PRS)

3. JUSTIFICACIÓN

La eutrofización es uno de los mayores problemas a los que se enfrentan los sistemas de agua dulce alrededor del mundo, en la Península de Yucatán los estudios sobre el estado trófico de los cenotes son escasos, por lo que resulta fundamental conocer la condición en la que se encuentran, su funcionamiento hidrológico para evaluar cómo afecta este en los procesos de eutrofización y al mismo tiempo la asociación del estado trófico con las actividades humanas para determinar cuáles son aquellas que generan un impacto negativo sobre la calidad del agua en los cenotes (eutrofización). Esto podría mejorar la toma de decisiones en las zonas afectadas y proponer acciones preventivas o correctivas que lleven a un uso adecuado de los cenotes y con esto asegurar los servicios ecosistémicos que proporcionan en armonía con las distintas actividades de relevancia económica en la región.

4. HIPÓTESIS

H1. Existen diferencias en el estado trófico de los cenotes dependiendo de las actividades predominantes que se realizan en cada una de las zonas de estudio.

H2. La estructura de la comunidad de fitoplancton varía con la estacionalidad, siendo diferente en las diferentes temporadas climáticas típicas de la zona.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general

Determinar el estado trófico de los cenotes de la Península de Yucatán durante las tres temporadas climáticas presentes en la región y su asociación con los principales grupos de fitoplancton.

5.2. Objetivos particulares

En los cenotes seleccionados durante las temporadas de nortes, secas y lluvias del año 2018:

- Caracterizar la variabilidad hidrológica, mediante perfiles de temperatura, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y pH.
- Determinar la estructura de la comunidad de fitoplancton en cada cenote.
- Determinar el estado trófico de estos sistemas acuáticos por medio de los índices propuestos por Carlson y la OECD, basados en la concentración de clorofila *a* y de fósforo total.

6. METODOLOGÍA

6.1. Determinación de sitios de muestreo

La selección de los sitios de estudio se llevó a cabo tomando como referencia algunos de los sitios estudiados por Hernández-Terrones *et al.* (2011) para la propuesta de la Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes en Yucatán. También se llevó a cabo un muestreo prospectivo en diciembre de 2017 para determinar si los sitios eran aptos de acuerdo a los objetivos del proyecto, así se seleccionaron 11 cenotes ubicados en tres zonas dentro del estado de Yucatán, cada una de las zonas tiene actividades económicas diferentes, la primera con actividad agrícola, ganadera y turística; la segunda con actividad ganadera y la tercera turística.

6.2. Descripción del área de estudio

Yucatán es uno de los cuatro estados mexicanos que conforman la Península de Yucatán, en donde el único recurso hídrico disponible es el agua subterránea (Bauer-Gottwein *et al.*, 2011). Las zonas de estudio de este proyecto se encuentran dentro de dos regiones hidrogeoquímicas y fisiográficas de acuerdo a la clasificación hecha por Perry *et al.* (2002); la primera, el área de alta densidad de cenotes en la región central norte de Yucatán, que presenta alta permeabilidad y una abundancia excepcional de cenotes en un karst maduro, y la segunda en el anillo de cenotes, una alineación circular de cenotes, que es la manifestación superficial de una zona

de alta permeabilidad, desarrollada en rocas carbonatadas, caracterizada por una baja densidad de cenotes comparada con el área fuera circundante.

El clima en el estado de Yucatán es cálido subhúmedo con lluvias en verano (García, 2004) y, como en el resto de la Península de Yucatán, se presentan tres temporadas climáticas determinadas por la precipitación y la temperatura. La temporada de secas (de marzo a mayo), la temporada de lluvias (de junio a octubre) y la temporada de nortes (de noviembre a febrero) (Schmitter-Soto *et al.* 2002). La temperatura promedio anual es de 26°C y la precipitación promedio anual oscila entre los 1200 a 500 milímetros (INEGI 2017).

En el área de estudio (Figura 1) se muestran las tres zonas del estado de Yucatán en las que se realizó este trabajo. En la zona A, localizada dentro de los municipios de Cenotillo y Tunkas, se trabajó en cuatro cenotes (Ucil, Mumundzonot, X-Azul y Lukulchán) en los que además de desarrollar actividades turísticas de bajo impacto, y en algunos también se extrae agua para riego agrícola. En la zona B, que presenta alta actividad ganadera, se ubica en el municipio de Dzilam de Bravo, en donde se analizaron muestras de dos cenotes ubicados dentro del rancho X-Labón Subín, un cenote localizado en el rancho San Miguel y un cenote más situado en el rancho Buena Esperanza. En la zona C, ubicada en el municipio de Toco, hay tres cenotes: Noh-Mozón, Nayáh y Suhén, todos con aprovechamiento turístico. En la Tabla 2 se muestra la posición geográfica de estos cuerpos de agua.

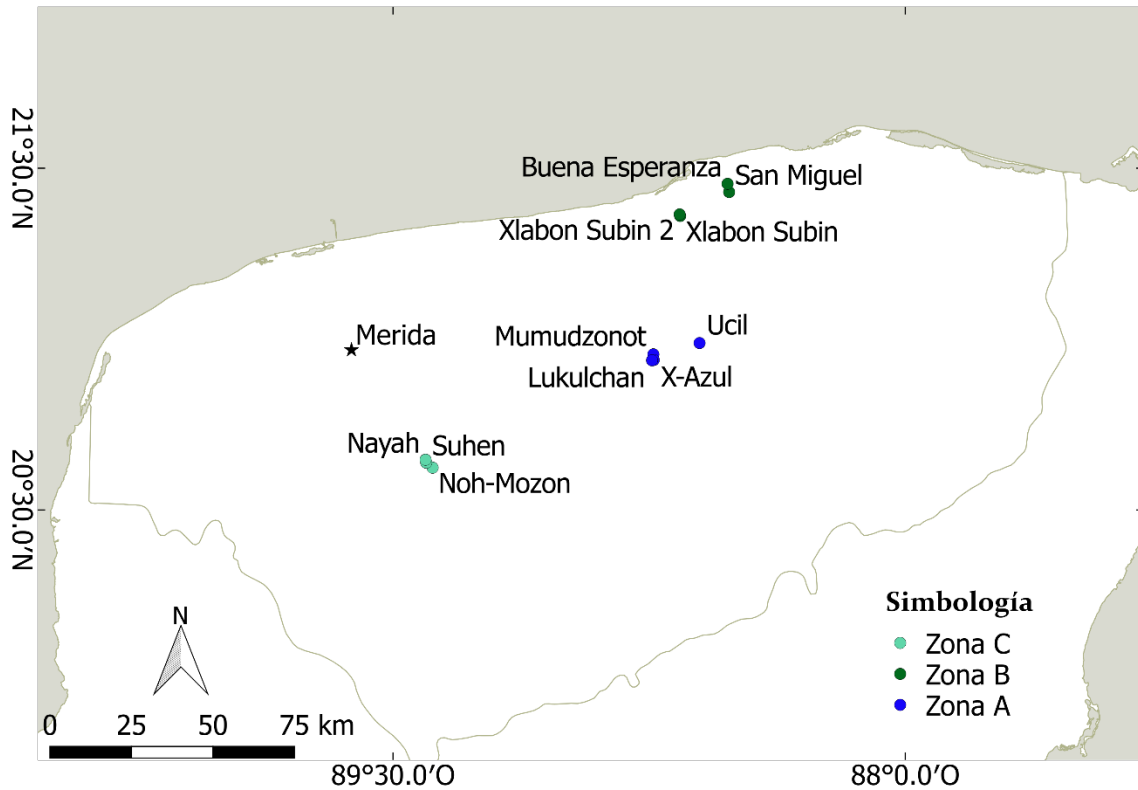


Figura 1. Sitios de estudio, agrupados por zonas.

Tabla 2. Coordenadas de localización de los cenotes agrupados por zona (Grados decimales).

Zona	Clave	Cenote	X	Y
A	UCL	Ucil	20.98814	-88.60233
	MDZ	Mumundzonot	20.95505	-88.73758
	XAZ	X-Azul	20.93852	-88.7366
	LKN	Lukunchán	20.93741	-88.74149
B	SM	San Miguel	21.43002	-88.5156
	BE	Buena Esperanza	21.45418	-88.52031
	XS	X-Labón Subin	21.36005	-88.65912
	XS2	X-Labón Subin 2	21.36467	-88.66065
C	NMZ	Noh-Mozón	20.62327	-89.38414
	SHN	Suhén	20.63808	-89.40279
	NYH	Nayáh	20.64654	-89.40469

Zona A

La zona A se encuentra ubicada en los municipios de Cenotillo y Tunkas, estos sitios son de propiedad ejidal con poca actividad agrícola-ganadera, con cultivo de pastura

de corte para alimento de ganado vacuno y actividad turística en desarrollo, en los que se llevan a cabo actividades de buceo, balneario y observación. Debido a las dificultades de acceso son poco visitados.

Ucil (UCL)

También conocido como Uusil o Usil, se ubica en el municipio de Cenotillo. Es un cenote semi-cerrado dentro de una gruta. Se accede mediante una entrada tipo caverna a un costado del cenote, descendiendo por unas escaleras adaptadas para llegar al espejo de agua. El agua es de color azul, tiene 6 m de ancho y 20 m de largo, con una profundidad máxima de 103 m (Ruiz-Silva *et al.*, 2007). El cenote tiene una toma para extracción de agua y tiene poca actividad turística.

Mumundzonot (MDZ)

Localizado en el municipio de Tunkás, es un cenote semi-cerrado dentro de una gruta, el acceso se realiza mediante una caverna y no cuenta con estructuras para facilitar el acceso, la caída libre de la superficie al espejo de agua es de 15 m aproximadamente, la cual mide 10 m de ancho y 12 m de largo, además cuenta con cavernas subacuáticas (Ruiz-Silva *et al.*, 2007), tiene una profundidad de 45 m. Recibe poca radiación solar debido a la vegetación circundante dominada por árboles cuyas raíces llegan hasta el espejo de agua.

X-Azul (XAZ)

Localizado en el municipio de Tunkás, es un cenote abierto, de 35 m de ancho y 45 m de largo con una profundidad de 20 m, no cuenta con escaleras para acceder al agua, la distancia del suelo al nivel al lente de agua es de aproximadamente 12 m (Ruiz-Silva *et al.*, 2007).

Lukunchán (LKN)

Localizado en el municipio de Tunkás, es un cenote abierto rodeado de árboles y alta vegetación, tiene una caverna subacuática que se puede observar desde afuera

y para acceder al agua se debe descender mediante las raíces de los árboles. El espejo de agua mide 15 m de ancho por 30 m de largo y tiene una profundidad máxima de 12 m (Ruiz-Silva *et al.*, 2007).

Zona B

Localizada en el municipio de Dzilam de Bravo, es una zona de actividad agrícola y ganadera, todos los cenotes de esta zona se encuentran dentro de ranchos vacunos o porcinos de propiedad privada y los usos y actividades varían en cada uno.

Rancho San Miguel (SM)

Cenote abierto con agua de color verde y lente de agua al nivel del suelo, tiene un diámetro de 45 m y una profundidad de 29 m.

Rancho Buena Esperanza (BE)

Este cenote se encuentra al lado de un corral ganadero, no se extrae agua del cenote debido a la perforación de un pozo de extracción a unos cuantos metros. El lente de agua se encuentra a nivel del suelo, se desconoce su profundidad.

X-Labón Subín (XS y XS2)

Dentro del rancho del X-Labón Subín se encuentran dos cenotes con aguas de coloración verde, el primero con una profundidad de 67 m y un lente de agua de 80 m x 100 m que se encuentra a ras de suelo (Ruiz-Silva *et al.*, 2007), del que se extrae agua para riego de pasturas, tiene una pequeña embarcación y un borde de concreto construido en una parte del cenote. El segundo cenote tiene una alta cantidad de materia orgánica que disminuye la visibilidad del fondo, tiene una profundidad de 20 m (Hernández-Terrones *et al.*, 2011).

Zona C

En el municipio de Tecoh, dentro la localidad de Pixyáh, los cenotes de Nayáh y Noh Mozón son aprovechados por actividades turísticas intensivas como natación, buceo y campamento, siendo estos una fuente de ingresos de los ejidatarios.

Noh Mozón (NMZ)

Cenote abierto con agua de tonalidad azul, cuya transparencia permite observar el fondo. Se accede mediante una escalera de madera adaptada. Tiene una profundidad máxima de 30 m, con dimensiones de 35 m de ancho por 48 m de largo (Ruiz-Silva *et al.*, 2007).

Nayáh (NYH)

Es un cenote semi-abierto con aguas azul cristalinas que permiten observar el fondo mediante un haz de luz que penetra cerca del borde. La distancia del techo a la superficie del agua es de 16 m y tiene una profundidad máxima de 30 m, con un lente de agua de 40 m de ancho y 40 m de largo, el acceso al agua se lleva a cabo mediante una escalera adaptada (Ruiz-Silva *et al.*, 2007).

Suhén (SHN)

Cenote abierto con agua color verde, bajo uso turístico debido a la presencia de abejas, la superficie se encuentra cubierta de hojarasca y cuenta con escaleras de acceso. La profundidad cerca al borde es de 11 m.

6.3. Estrategia de muestreo

Para abarcar las tres estaciones climáticas presentes en la Península de Yucatán, se llevaron a cabo tres salidas de campo en los meses de febrero (nortes), abril (secas) y julio (lluvias) del año 2018, para la colecta de muestras para cuantificar nutrientes, pigmentos fotosintéticos y abundancias de fitoplancton (Tabla 3), así como la medición *in situ* de perfiles de temperatura, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y potencial de hidrógeno.

Originalmente se tenía planeado trabajar con once cenotes, esto solo fue posible durante la temporada de nortes, ya que debido a dificultades de acceso no se pudieron obtener muestras de los cenotes del rancho X-Labón Subín en las temporadas de secas y lluvias.

Tabla 3. Detalle de las actividades de campo.

Campaña	Núm. de cenotes	Muestras pigmentos	Muestras nutrientes inorgánicos*	Muestras NT* y PT*	Muestras fitoplancton
Nortes (26-28 feb 2018)	11	11	17	17	11
Secas (30 abr-02 may 2018)	9	9	15	15	9
Lluvias (02-04 jul 2018)	9	9	15	15	9

*Se tomaron dos réplicas de un cenote por zona, procurando que en cada temporada fuese un cenote diferente.

6.4. Caracterización hidrológica

Para determinar las características hidrológicas de los cenotes se realizaron mediciones *in situ* para generar perfiles de parámetros fisicoquímicos con apoyo de un perfilador CTD Sea Bird 19 plus desde 1 m hasta la máxima profundidad. Con el mismo equipo se determinó la profundidad, temperatura, conductividad eléctrica y concentración de oxígeno disuelto durante las tres campañas de muestreo. El pH se midió sólo en dos temporadas, secas y lluvias utilizando el mismo equipo. Para la transformación y ajuste de datos obtenidos con el perfilador CTD, se usó el programa SeaBird Data Processing, en el que se realizó la conversión, alineación, filtrado y promediado de los datos para su posterior análisis en Matlab, en dónde se graficaron los perfiles de temperatura, conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD) y potencial de hidrógeno (pH), medidos durante las tres campañas de muestreo.

También se llevó a cabo la medición de la profundidad del disco de Secchi para determinar la variación en la transparencia de los cenotes.

6.5. Determinación de la abundancia de fitoplancton

La determinación de las abundancias de fitoplancton se llevó a cabo siguiendo el método Uthermöhl (Reguera *et al.*, 2011). Se tomaron muestras de agua en superficie y se almacenaron en frascos color ámbar de 250 ml, estas muestras fueron fijadas *in situ* con una solución neutra de Lugol.

En el laboratorio, se emplearon cámaras de sedimentación de 10, 50 o 100 ml dependiendo de la coloración de cada cenote, tomando 100 ml de muestra para aquellos con mayor transparencia y 10 ml para los de coloración verdosa. El tiempo de sedimentación depende de la altura de la cámara de sedimentación (1 hora por cada centímetro de altura). Posteriormente se llevó a cabo la lectura de la muestra en un microscopio invertido Zeiss Axiovert modelo 40 CFL hasta llegar a 400 organismos en aquellas muestras con gran densidad de células y para las que tuvieron menores densidades se contó la cámara completa, esto para obtener una precisión de conteo de $\pm 10\%$.

La identificación de los organismos contados se llevó a cabo con apoyo de la literatura científica sobre la diversidad de especies en cenotes de la Península de Yucatán, los organismos identificados se agruparon en grupos principales: bacilariofitas, clorofitas, cianofitas y criptofitas. Una vez identificados se realizó la determinación de la densidad por grupo, usando la siguiente fórmula:

$$N = \left(\frac{A \cdot n}{a} \right) f$$

Donde N es la densidad de fitoplancton en células L^{-1} , A el área total de la cámara, n el número de células contabilizadas, a el área leída y f el factor de calibración de acuerdo al volumen sedimentado.

6.6. Determinación de la concentración de nutrientes

Se tomaron muestras superficiales de agua para la determinación de nutrientes inorgánicos y totales. Las muestras de nutrientes inorgánico, NO_x ($\text{NO}_3 + \text{NO}_2$) y de PO_4^{3-} denominado fósforo reactivo soluble (*PRS*), se filtraron 60 ml de agua *in situ* con un filtro Millipore con apertura de poro de $0.45\ \mu\text{m}$ y se conservaron en hielo a una temperatura aproximada de 4°C durante el transporte al laboratorio en dónde se almacenaron congeladas hasta su análisis.

La preparación de las muestras de nitrógeno total (N_T) y fósforo total (P_T), se llevó a cabo siguiendo la metodología propuesta por Valderrama (1981), se preparó un reactivo de oxidación (RO), disolviendo 50 g de persulfato de potasio y 30 g de ácido bórico en 350 ml de hidróxido de sodio 1M, y aforando dicha solución a 1 L con agua desionizada. En campo se tomaron 30 ml de muestra sin filtrar en viales ámbar, a las cuales se les añadieron 4 ml de RO. Posteriormente, en el laboratorio fueron digeridas durante 30 min en una autoclave Allamerican 25x-1, para completar la reacción de oxidación de los nutrientes, las muestras se preservaron congeladas hasta su análisis. La medición de la concentración de nutrientes se llevó a cabo de la misma manera que los nutrientes inorgánicos.

La determinación de la concentración de nutrientes se realizó por las técnicas colorimétricas descritas por Grasshoff *et al.* (1981), por medio de un autoanalizador de nutrientes de flujo segmentado marca Skalar equipado con cuatro canales para cada uno de los iones: nitratos (NO_3) y nitritos (NO_2), amonio (NH_4) y fosfatos (PO_4^{3-}). Para la calibración del equipo se dejó correr agua tridestilada durante 20 minutos para estabilizar los sensores, posteriormente se realizó un enjuague con agua de mar sintética (0.5 M de NaCl) para expulsar el agua tridestilada, finalmente se llevó a cabo una corrida de 20 minutos con los estándares de calibración para realizar la curva de calibración.

Una vez calibrado el equipo se realizó una corrida de prueba para determinar el volumen de dilución, se realizaron diluciones 1:10, 1:5 y 1:3.33 con las muestras que se habían tomado por duplicado y la solución madre de agua de mar sintética.

Finalmente se determinó usar una dilución 1:10, se realizó una corrida para nutrientes totales y otra para inorgánicos. Las muestras se corrieron por duplicado en grupos de tres, con dos blancos de agua tridestilada entre cada grupo y un lavado al final de la corrida. Una vez obtenidos los resultados se hizo la estimación de la concentración real mediante el factor de dilución. Las concentraciones se expresaron en $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$. La fracción orgánica, en este caso fósforo orgánico (P_{Org}) y nitrógeno orgánico (N_{Org}) se obtuvo mediante la diferencia de las concentraciones de nutrientes totales e inorgánicos.

6.7. Estimación de la concentración de pigmentos

Para la determinación de pigmentos fotosintéticos se colectaron de uno a dos litros de agua dependiendo de la transparencia del sitio, en botellas ámbar que fueron preservadas a $\sim 4^{\circ}\text{C}$ hasta su llegada al laboratorio. Cada muestra se filtró a través de filtros GF/F de $0.7\ \mu\text{m}$ de apertura de poro. Los filtros se embalaron con papel aluminio y se preservaron congelados de inmediato en nitrógeno líquido hasta su análisis.

La extracción y cuantificación de la concentración de pigmentos fotosintéticos incluida la clorofila *a* se realizó siguiendo la metodología propuesta por Van Heukelem & Thomas (2001), siguiendo las modificaciones propuestas por Almazán-Becerril & García-Mendoza (2008), mediante cromatografía líquida de alto desempeño (HPLC). Se realizó la extracción de los pigmentos colocando cada filtro en un tubo de microcentrífuga de 2 ml al cual se le añadieron perlas de sílice-zirconia de 0.5 mm y 1 ml de acetona al 100% previamente enfriada. Para llevar a cabo la ruptura de las células se agitaron las muestras durante 10 segundos a 500 rpm en un Mini Beadbeater marca Biospec, las muestras se dejaron sedimentar durante 24 horas a -4°C . Posteriormente, para la depuración del extracto las muestras se centrifugaron a 2°C y 13000 rpm durante 8 minutos. Se extrajo el sobrenadante con ayuda de una micropipeta y se colocó en un tubo Eppendorf de 1.5 ml, tras lo cual se realizó una segunda centrifugación con las mismas condiciones durante 5 minutos. Se colocaron 200 μl de extracto en un vial color ámbar con tapa septum,

se añadieron 60 μ l de TBAA (Acetato terbutil amonio 28 mM) y se agitaron durante 10 segundos en un vortex para homogeneizar la muestra.

La determinación de los pigmentos se llevó a cabo mediante la técnica descrita por Van Heukelem & Thomas (2001) que consiste en un sistema binario de solventes (solvente A: 70% metanol/30% TBAA 28 mM; solvente B: metanol al 100%) con un protocolo de elusión en gradiente de la siguiente manera: 0 min con 95% de solvente A, a los 22 y 27 min con de 5% de solvente A, y finalmente 5% de solvente A al min 30, los porcentajes restantes corresponden al solvente B y la corrida tiene una duración de 33 min con una longitud de onda de 436.4 nm. Se utilizó un equipo Agilent modelo 1260 equipado con una columna de fase reversa Zorbax XDB-C8 de 150 mm $\times$ 4.6 mm de diámetro interno y 3.5 μ m de tamaño de poro.

Para llevar a cabo la identificación y cuantificación de los pigmentos fotosintéticos, se usaron estándares para detectar clorofila a, clorofila b, clorofila c2, clorofila c3, divinil clorofila a, peridina, fucoxantina, 19-but-fucoxantina, 19-hex-fucoxantina, praxinosantina, violaxantina, diadinoxantina, aloxantina, diatoxantina, zeaxantina, gyroxantina diester y beta-caroteno. Se realizó la comparación de los resultados con dichos estándares mediante la siguiente ecuación:

$$[\text{pigmento}] = \frac{(A/f) \cdot V_e}{V_f}$$

En donde la concentración de pigmentos se obtiene en $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, A es el área obtenida de la integración de cada pico en el cromatograma, f es el factor que corresponde al valor de la pendiente obtenido de la curva de calibración de cada estándar, V_e es el volumen de acetona que se usó para la extracción (1 ml) y V_f es el volumen de agua filtrado.

6.8. Análisis quimiotaxonómico

El análisis quimiotaxonómico de las poblaciones de fitoplancton se realizó con el software CHEMTAX versión 1.95 (Mackey *et al.*, 1994), usando los pigmentos obtenidos mediante HPLC para identificar cinco grupos de fitoplancton con los siguientes pigmentos marcadores: (1) fucoxantina para bacilariofitas, (2) violaxantina y Chl *b* para clorofitas, (3) zeaxantina para cianobacterias, (4) aloxantina para criptofitas y (5) peridininina para dinoflagelados. Siguiendo las observaciones hechas por Higgins *et al.*, (2011). El objetivo del algoritmo de CHEMTAX es la descomposición factorial de la matriz de concentración de pigmentos obtenidos mediante HPLC [S], en una matriz de razones pigmentarias esperadas para cada clase [F₀], obtenidas de datos reportados previamente y otra de contribución de los grupos de fitoplancton a la clorofila total [C]. CHEMTAX introduce una matriz de razones pigmentarias pigmento:clorofila *a* y por un procedimiento iterativo que minimiza los residuales, se obtiene una matriz de contribuciones de cada clase a la clorofila *a* [C] (Mackey *et al.*, 1996).

$$[S] = [C] * [F_0]$$

Donde:

[S] = Matriz de concentración de pigmentos

[C] = Matriz de contribución de cada clase a la clorofila total

[F₀] = Matriz de razones pigmento:Chl *a*

La estrategia seguida para el análisis de los pigmentos fotosintéticos consistió en agrupar las muestras de acuerdo a los pigmentos en común y las concentraciones de Chl *a*. Así, se formaron tres matrices de concentración de pigmentos: la primera compuesta de muestras sin peridininina y con concentraciones de Chl *a* menores a 1 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, la segunda con concentraciones de Chl *a* de entre 1-7 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ y la última conteniendo las muestras con concentraciones de Chl *a* mayores a 7 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. La matriz inicial de razones pigmentarias fue tomada de Hernández-Terrones *et al.* (2011). Una vez obtenidas las proporciones de aporte de cada grupo al total de la Chl *a*, se calculó la abundancia relativa de los grupos de fitoplancton.

6.9. Análisis de datos

Con el fin de determinar la variabilidad temporal y espacial de las muestras, y evaluar si la temporalidad o las características de las zonas tienen un efecto sobre los valores, se llevó a cabo la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis a través del software Statistica versión 10, con un valor de significancia del 5% ($\alpha=0.05$). Se analizaron los resultados obtenidos de los parámetros hidrológicos (CE, OD, T) en los primeros tres metros de profundidad, las concentraciones de nutrientes (P_T , N_T , PRS, NO_x , N_{org} , P_{org}), la concentración de Chl *a* y las densidades de fitoplancton. Para los valores de pH se realizó una prueba de Mann-Whitney, ya que solo se obtuvieron mediciones para las temporadas de secas y lluvias.

6.10. Índices tróficos

La determinación del estado trófico de los cenotes se llevó a cabo mediante los Índices de Estado Trófico (TSI) propuestos por Carlson (1977), en este caso se usaron la concentración de clorofila (TSI_{Chl-a}) y de fósforo total (TSI_{PT}) para su determinación. La profundidad del disco de Secchi se descartó ya que en algunos casos llegaba hasta el fondo del cenote, y esto podía generar valores erróneos. Los índices fueron calculados mediante las siguientes ecuaciones:

$$TSI(Chl\ a) = 10 \left(6 - \frac{2.04 \ln Chl\ a}{\ln 2} \right)$$

$$TSI(PT) = 10 \left(6 - \frac{\ln \frac{48}{PT}}{\ln 2} \right)$$

En dónde TSI es el Índice de Estado Trófico, que varía de 0 a 100, Chl *a* es la concentración de clorofila en $mg \cdot m^{-3}$ y P_T la concentración de fósforo total en $mg \cdot m^{-3}$.

Se usó una escala de color para codificar cada estado trófico (Tabla 4). Para la comparabilidad de los valores del TSI se utilizó la escala usada por Kratzer &

Brezonik (1981) para lagos de Florida, E.U.A. También se estimó el estado trófico de acuerdo con los valores propuestos por la OECD (1982) para Chl *a* y P_T .

Tabla 4. Valores para los índices de estado trófico de Carlson tomado de Kratzer & Brezonik (1981) y rango de concentraciones propuestos por la OECD para cada estado trófico.

	Estado trófico	TSI	Carlson (1972)		OECD	
			P_T (mg·m ⁻³)	Chl <i>a</i> (mg·m ⁻³)	P_T (μg·L ⁻¹)	Chl <i>a</i> (μg·L ⁻¹)
	Ultraoligotrófico	0-29	0.75	0.04	<4	<1
	Oligotrófico	30-44	6	0.94	4 a 10	1 a 2.5
	Mesotrófico	45-52	17	5	10 a 35	2.5 a 7.9
	Eutrófico	53-69	30	10	35 a 100	8 a 25
	Hipereutrófico	70-100	96	56	>100	>25

7. RESULTADOS

Los usos de los cenotes varían de acuerdo a la región. La zona A es una zona con actividad turística de bajo impacto que tampoco es aprovechada con fines de lucro, y son pocos los turistas que acceden a ellos. Además, en el caso de UCL, existe una toma de agua para extracción para uso de riego. En la zona B, siendo una zona completamente ganadera, algunos cenotes se usan para riego de pasturas y algunos cenotes no son aprovechados directamente, sin embargo, se encuentran dentro de ranchos y cerca de potreros o corrales para el manejo del ganado, y finalmente, en la zona C, se encuentran cenotes con mayor actividad turística, estos son la fuente de ingreso de ejidatarios y propietarios, en los cuales se llevan a cabo actividades turísticas.

Las características principales de los cenotes se muestran en la Tabla 5. Se puede observar que la variación de la profundidad entre cenotes está en el rango de entre 8 y 95 m aproximadamente, la menor profundidad del disco de Secchi se encontró en el cenote del rancho XS con un valor de 0.5 m, mientras que en los tres cenotes de la zona C la transparencia permite observar el disco hasta el fondo.

Tabla 5. Características generales de los cenotes.

Zona	Nombre	Clave	Uso del Agua	Z _{DS} (m)	Prof. (m)	Apertura	Tipo
A	Ucil	UCL	Riego/turismo	18.5	95.8	SC	M
	Mumudzonot	MDZ	Turístico	18	44.9	SC	H
	X-Azul	XAZ	Sin uso	6	20.3	A	H
	Lukunchan	LKN	Turístico	8	8.1	A	H
B	San Miguel	SM	Ganadero	1	28.5	A	ND
	B. Esperanza	BE	Ganadero	ND	ND	A	H
	X-Labón Subín	XS	Riego	2.6	67.3	A	M
	X-Labón Subín 2	XS2	Sin uso	0.5	ND	A	ND
C	Noh-Mozón	NMZ	Turístico	16 (fondo)	16.3	SC	H
	Suhen	SHN	Turístico	11 (fondo)	11.2	SC	H
	Nayáh	NYH	Turístico	16 (fondo)	16.3	SC	H

ND=No determinado, SC=Semicerrado, A=Abierto, M=Meromítico, H=Holomítico

7.1. Hidrología

Los resultados mostrados corresponden a nueve cenotes, ya que en el cenote del rancho XS2 y del rancho BE no se pudieron realizar las mediciones de los perfiles.

Los cambios más importantes en los cenotes ocurrieron en los primeros metros de la columna de agua, ya que en cenotes profundos las diferencias de las variables hidrológicas en fondo fueron mínimas o indetectables. Por lo anterior, las comparaciones estadísticas se realizaron con los datos de los primeros tres metros de la columna de agua. En general, se pudo observar que todos los cenotes presentaron una marcada variación estacional de la temperatura con los valores más bajos detectados en la temporada de nortes, posteriormente, en la temporada de secas hubo un incremento y finalmente, la temperatura más alta se registró en la temporada de lluvias. La CE de los cenotes también presentó variación con respecto a las temporadas climáticas excepto en el cenote Lukunchán, donde no hubo variaciones. Con respecto al OD, también se observaron diferencias estacionales cuya variación mostró una relación inversa con la temperatura, siendo mayor la concentración de oxígeno en la temporada de nortes y la menor en temporada de lluvias con excepción nuevamente de Lukunchán donde no se observaron diferencias. Finalmente, el pH que solamente se obtuvo en secas y lluvias y no presentó diferencias significativas entre estas temporadas en ningún cenote. Las variaciones más altas de las variables hidrológicas entre temporadas se observaron en los cenotes abiertos.

Zona A

El cenote UCL (Figura 2) presentó una variación estacional en todos los parámetros medidos, con diferencias significativas entre la temporada de nortes y lluvias ($p < 0.05$) en los primeros tres metros de profundidad. Respecto a la variación en la columna de agua, todos los parámetros excepto el pH durante lluvias, tuvieron valores homogéneos en los primeros 67 m de profundidad y posteriormente mostraron un incremento o decremento de los valores de cada parámetro. La

temperatura presentó un incremento gradual hasta llegar al fondo con una variación de 1.19 ± 0.7 °C entre la superficie y el fondo (Figura 2A). La conductividad eléctrica presentó este mismo patrón con un valor de 1.7 mScm^{-1} en superficie y a partir de este punto se incrementó paulatinamente hasta llegar a un máximo de $39.8 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ en el fondo (Figura 2B). La concentración de OD disminuyó a partir de los 67 m de $\sim 3 \text{ mgL}^{-1}$ a 0 mgL^{-1} , aunque en la temporada de lluvias esto ocurrió hasta los 72 m de profundidad (Figura 2C). Con el pH no se observaron cambios estacionales ($p > 0.05$, Mann-Whitney test), pero si se observó un cambio a los 67 m de profundidad en la temporada de secas, mientras que en la temporada de lluvias los valores permanecieron homogéneos (~ 6) hasta los 17 m, posterior a ello se observó un incremento gradual hasta los 50 m y a partir de ahí comenzó a disminuir nuevamente (Figura 2D).

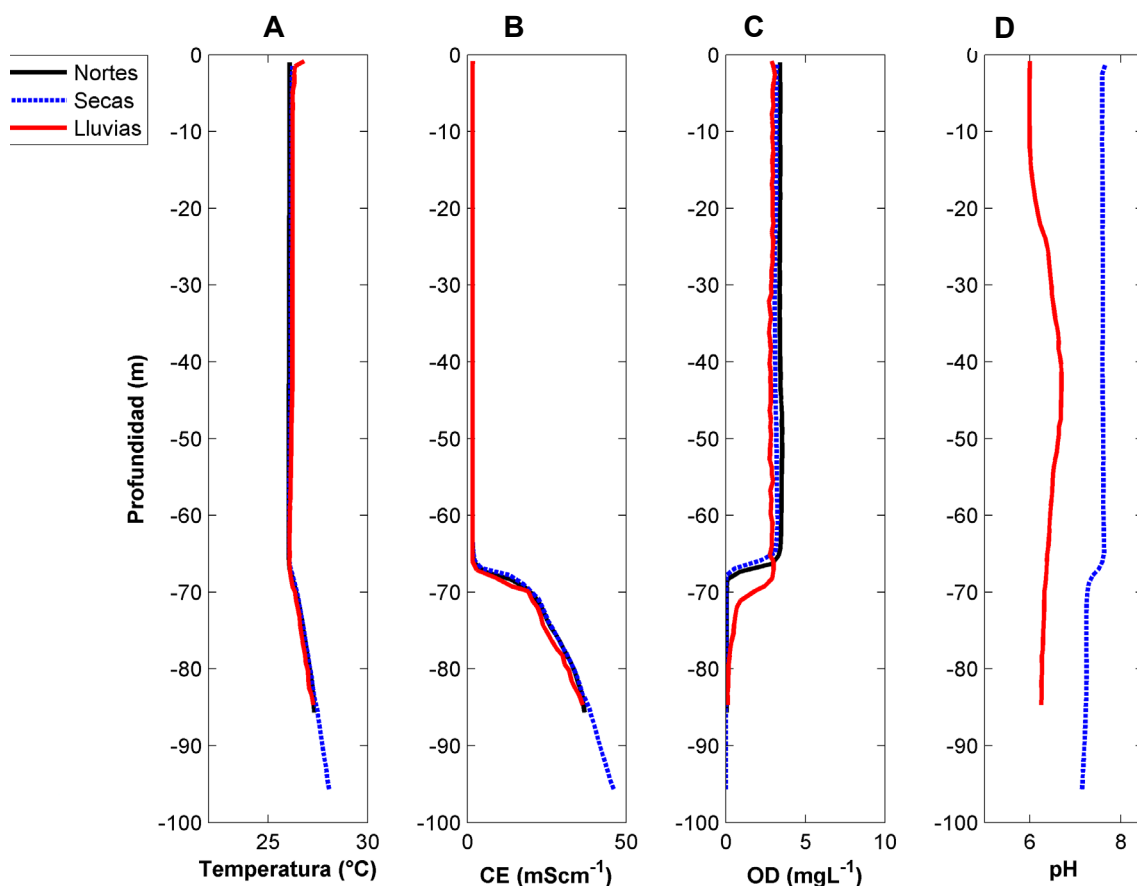


Figura 2. Cenote Ucil, perfiles de temperatura (A), Conductividad (B), Oxígeno Disuelto (C) y pH (D) en temporada de nortes (línea negra), secas (línea punteada azul) y lluvias (línea roja).

En el cenote MDZ (Figura 3), hubo variación estacional en la temperatura superficial entre las temporadas de nortes y lluvias ($p < 0.05$). Durante la temporada de nortes, la temperatura se mantuvo homogénea a lo largo de la columna de agua mientras que en la temporada de secas y lluvias hubo un incremento de la temperatura en los primeros 20 m, después de esto comenzó a disminuir hasta los 27 m en donde la variación disminuyó y los valores se acercaron más a 24.4°C (Figura 3A). La CE fue homogénea a lo largo de la columna de agua y presentó cambios durante las temporadas de secas y lluvias ($p < 0.05$) debido a un incremento en la temporada de lluvias (Figura 3B). En el caso de la concentración de OD hubo variación en las temporadas de nortes y lluvias ($p < 0.05$) y algunas pequeñas variaciones a lo largo de la columna de agua (Figura 3C). Finalmente, el pH

disminuyó de 7.8 en la temporada de secas a 6.3 en temporada de lluvias (Figura 3D).

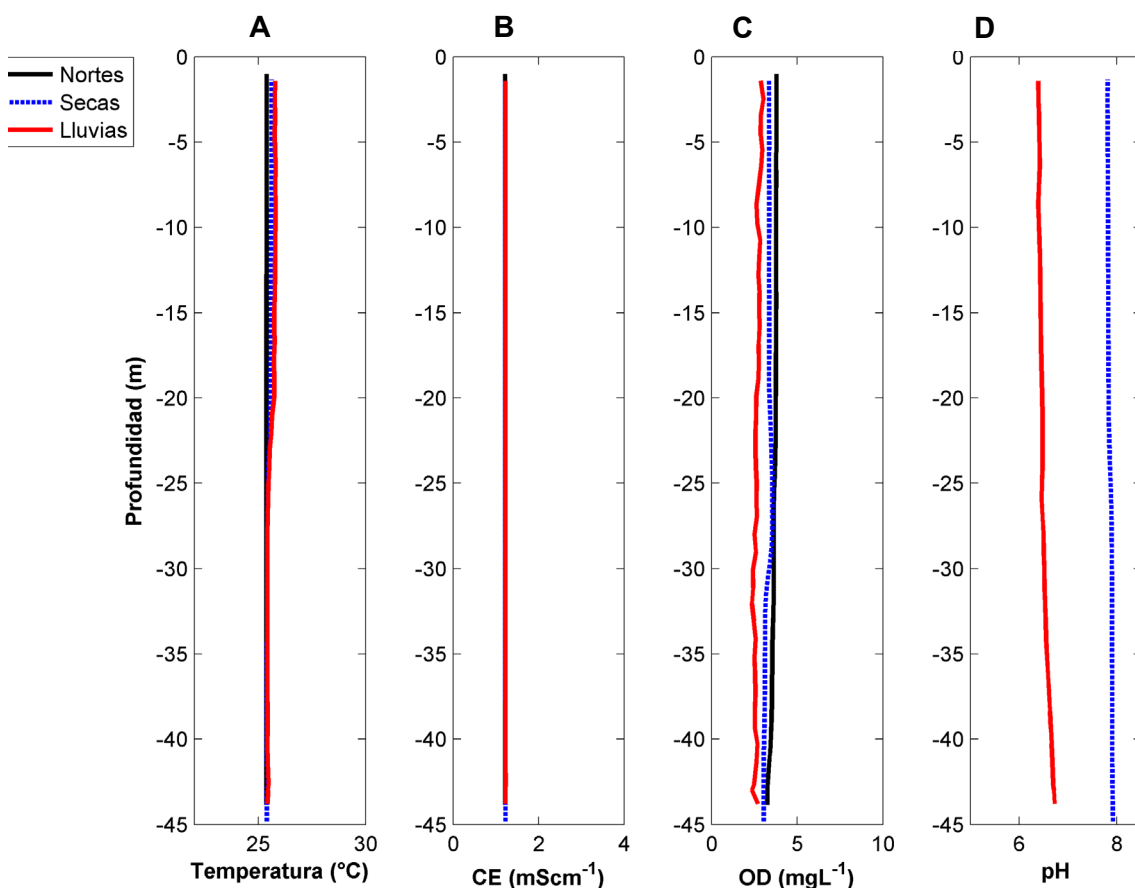


Figura 3. Cenote Mumundzonot, perfiles de temperatura (A), Conductividad (B), Oxígeno Disuelto (C) y pH (D) en temporada de nortes (línea negra), secas (línea punteada azul) y lluvias (línea roja).

En el cenote XAZ (Figura 4) tuvo una variación estacional en todos los parámetros entre las temporadas de nortes y lluvias ($p < 0.05$), la temperatura presentó un incremento de $\sim 1^{\circ}\text{C}$ entre cada temporada, pasando de 24.3°C en la temporada de nortes a 26.2°C en la temporada de lluvias (figura 4A). La CE permaneció sin cambios entre profundidades (Figura 4B), en la temporada de nortes y secas el OD tuvo una variación ($< 0.5\text{ mgL}^{-1}$), mientras que la variación de estas dos con la temporada de lluvias fue de 1.5 mgL^{-1} en promedio (Figura 4D) El pH varió de 6.6 durante la temporada de secas a 6.2 en la temporada de lluvias, aunque esta diferencia no fue estadísticamente significativa ($p > 0.05$) (Figura 4D).

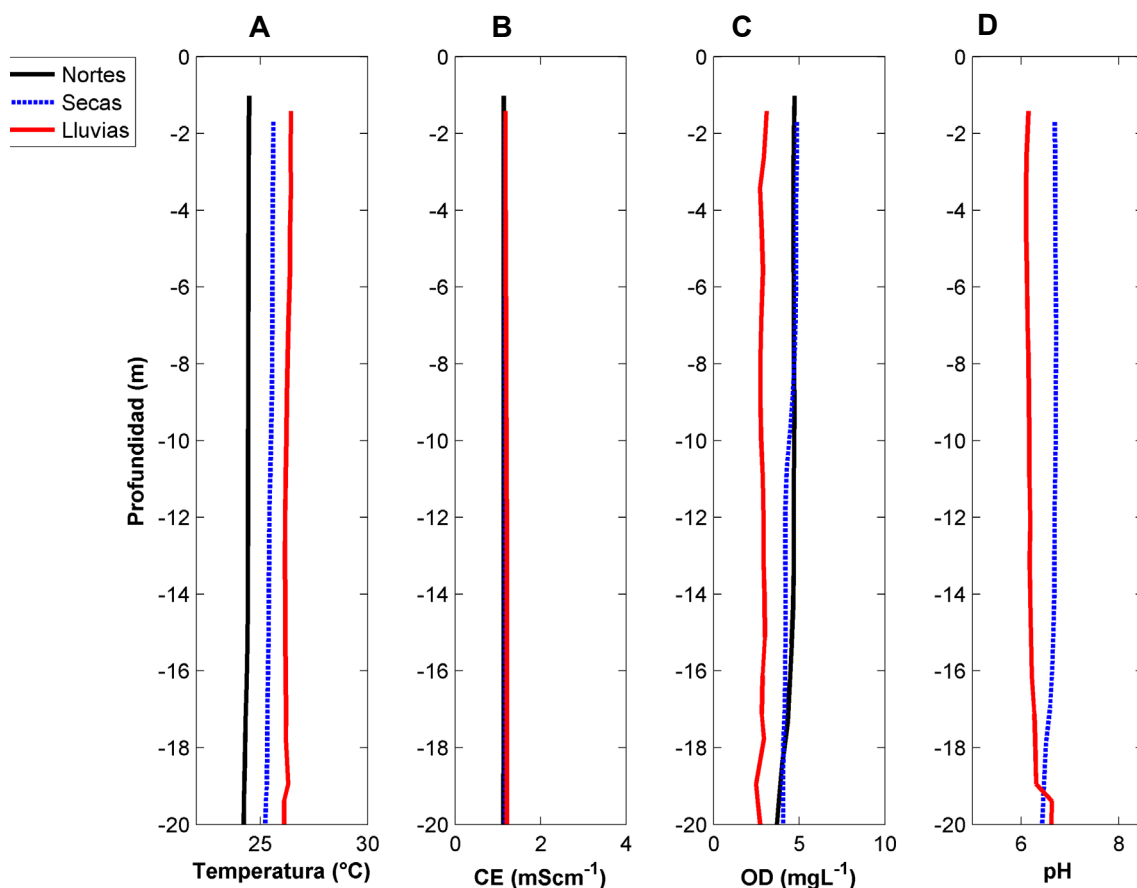


Figura 4. Cenote X-Azul, perfiles de temperatura (A), Conductividad (B), Oxígeno Disuelto (C) y pH (D) en temporada de nortes (línea negra), secas (línea punteada azul) y lluvias (línea roja).

Del cenote LKN (Figura 5), sólo se obtuvo la medición de los perfiles hasta ~4 m para la temporada de secas. Sin embargo, se pudo observar que la temperatura tuvo variaciones entre la temporada de nortes y lluvias ($p < 0.05$), la menor temperatura se presentó en la temporada de nortes con un valor promedio de 23.31 °C y de 24.16 °C en la temporada de lluvias. En la temporada de secas se observó un incremento de 0.5 °C a partir de los 7.5 m (Figura 5A). La CE y la concentración de OD no presentaron cambios significativos en las temporadas ($p > 0.05$) y la CE fue homogénea a lo largo de la columna de agua, con un valor de 1.1 mScm⁻¹ (Figura 5B). La concentración de OD también fue homogénea a lo largo de la columna de agua durante la temporada de nortes, sin embargo en la temporada de lluvias se pudo observar un incremento a 7.5 m, pasando de 2.5 gML⁻¹

¹ a 3.7 mgL⁻¹ en el fondo (Figura 5C). Los valores de pH mostraron que, por lo menos en la temporada de lluvias no existió estratificación, sin embargo. La variación estacional no fue significativa ($p>0.05$), en la temporada de secas el pH promedio fue de 7.5 y posteriormente en la temporada de lluvias disminuyó a 5.9 (Figura 5D).

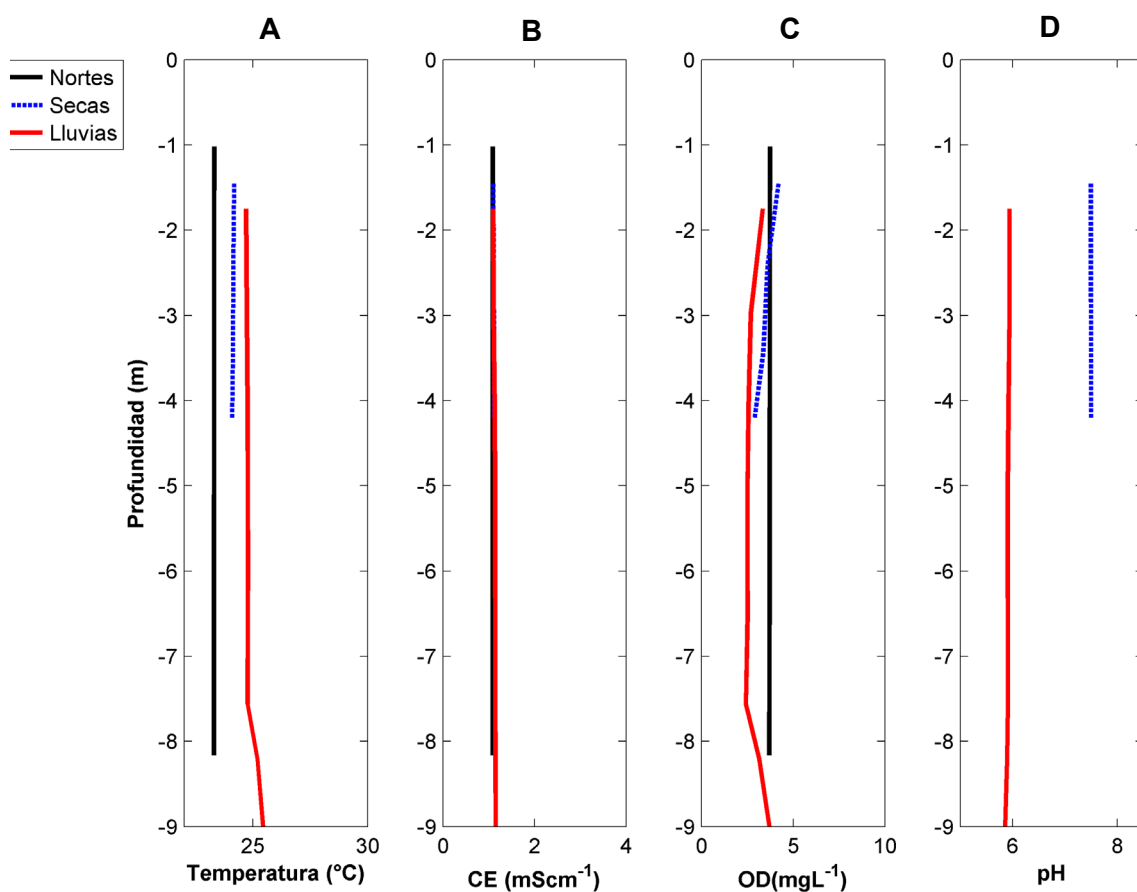


Figura 5. Cenote Lukunchan, perfiles de temperatura (A), Conductividad (B), Oxígeno Disuelto (C) y pH (D) en la temporada de nortes (línea negra), secas (línea punteada azul) y lluvias (línea roja).

Zona B

Los cenotes de esta zona se encuentran dentro de ranchos ganaderos. En la temporada de nortes se midieron perfiles en los cenotes XS y SM, pero debido a cuestiones de acceso para la temporada de secas y lluvias sólo se realizaron mediciones en el rancho San Miguel. Del cenote BE no se obtuvieron perfiles en ninguna temporada, sólo datos superficiales.

En el cenote SM (Figura 6), se presentaron diferencias en los primeros metros de profundidad entre la temporada de nortes y lluvias ($p < 0.05$) en todos los parámetros medidos. El perfil de temperatura no presentó cambios durante la temporada de nortes, sin embargo, durante las temporadas de secas y lluvias se observó una disminución desde la superficie hasta los 10 m, donde la temperatura se volvió uniforme a lo largo de la columna de agua (Figura 6A). La CE tuvo un patrón similar al de la temperatura con una variación en superficie $< 0.5 \text{ mScm}^{-1}$ y un valor de $\sim 1.7 \text{ mScm}^{-1}$ a partir de los 12 m de profundidad (Figura 6B). El perfil de la concentración de OD en la temporada de lluvias permaneció homogéneo, en tanto que en la temporada de secas hubo un incremento en superficie; finalmente en la temporada de nortes se observó un incremento de la concentración con un valor promedio de 1 mgL^{-1} (Figura 6C), a partir de los 25 m de profundidad el oxígeno fue cero en las tres temporadas. El pH no presentó variación estacional ($p > 0.05$), pero en la columna de agua hubo una disminución en el fondo durante la temporada de lluvias, pasando de 6.9 en la columna de agua a 6.5 en el fondo, la temporada de secas no presentó estratificación y se mantuvo en un valor de 7 (Figura 6D).

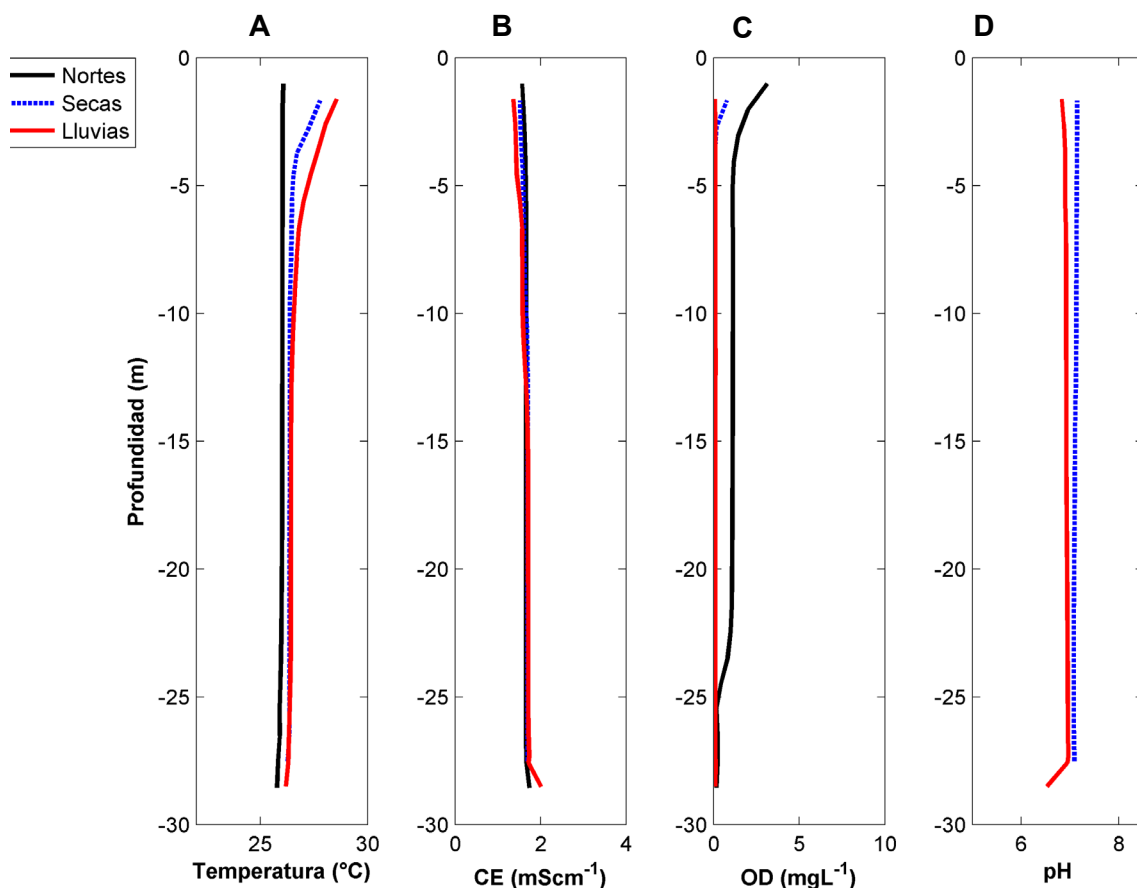


Figura 6. Cenote del Rancho San Miguel, perfiles de temperatura (A), Conductividad (B), Oxígeno Disuelto (C) y pH (D) en la temporada de nortes (línea negra), secas (línea punteada azul) y lluvias (línea roja).

En el cenote XS (Figura 7), que se encuentra dentro del rancho del mismo nombre, se pudo observar una disminución de la temperatura entre los 40 y 50 m de profundidad y posteriormente un incremento que continuó hasta el fondo (Figura 7A). En la CE se pudo observar un incremento abrupto a partir de los 50 m, pasando de 2 mScm⁻¹ a un máximo de 54 mScm⁻¹ (Figura 7B). La concentración de OD en la superficie rebasó los 6 mgL⁻¹ para posteriormente disminuir hasta los 10 m de profundidad, en donde se estabilizó y a partir de los 49 m el OD se agota, dejando un ambiente anóxico (Figura 7C).

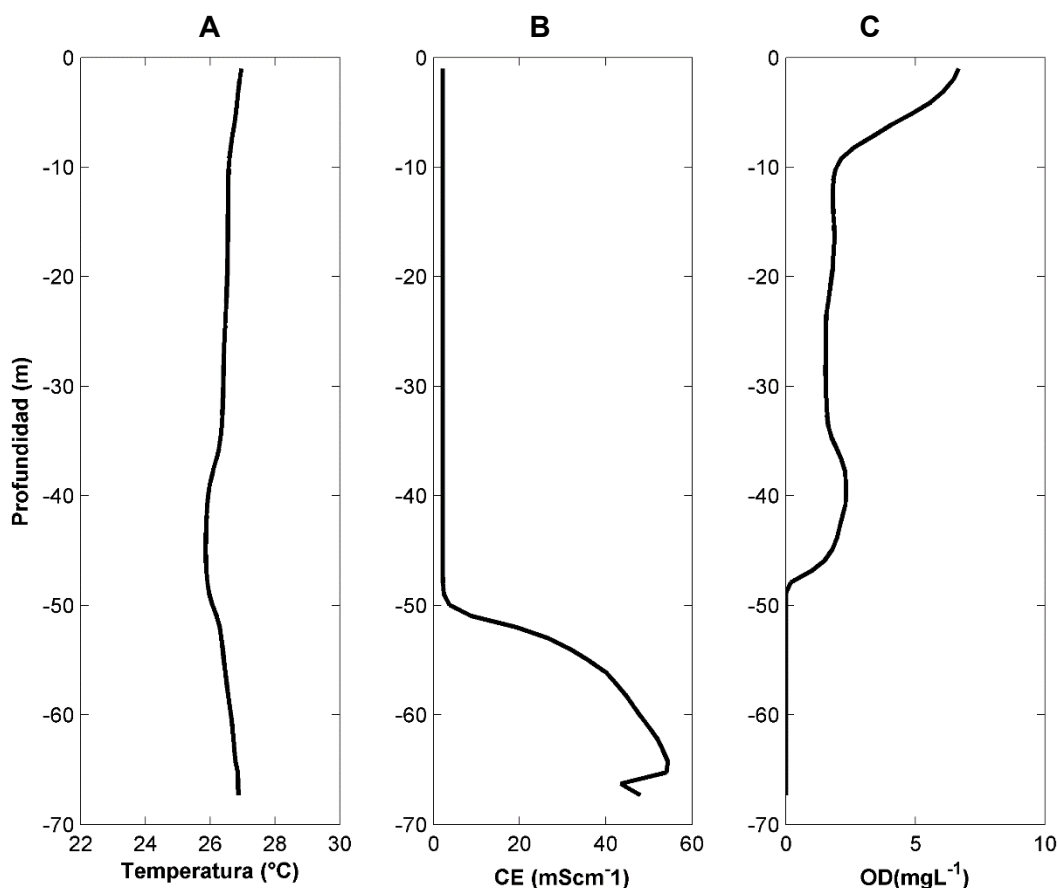


Figura 7. Cenote del rancho X-Labón Subín, perfiles de temperatura (A), Conductividad (B) y Oxígeno Disuelto (C) en la temporada de nortes.

Zona C

La zona C cuenta con tres cenotes de uso turístico, con una profundidad de entre 11 y 16 m, en los que la transparencia permite observar el fondo. Además, los tres cenotes estudiados tienen una columna de agua homogénea, y presentaron variaciones estacionales en los parámetros medidos ($p < 0.05$) excepto en el pH, que se mantuvo en 7 en los tres cenotes de esta zona y no presentó variaciones a lo largo de la columna de agua.

En el cenote MNZ (Figura 8) los perfiles reflejaron que la columna de agua fue homogénea en todos los parámetros medidos y que solo existió variación estacional entre las temporadas de nortes y lluvias ($p < 0.05$), en la temperatura, la

CE y la concentración de OD. En el caso de la temperatura, la variación entre temporadas (Figura 8A) fue menor a 0.2 °C, mostrando un aumento de nortes a lluvias, con la menor temperatura en nortes y la mayor en secas, mientras que la CE varió de 1.18 mScm⁻¹ en nortes a 1.19 mScm⁻¹ en lluvias (Figura 8B). Con respecto a la concentración de OD, la variación entre temporadas fue ~0.5 mgL⁻¹, y el gradiente fue inverso al de la temperatura, en este caso la menor concentración de OD se encontró en la temporada de lluvias y la mayor en nortes (Figura 8C). El pH no presentó variación estacional ($p>0.05$), y el perfil se mantuvo en 7 sin variaciones en la columna durante la temporada de secas, mientras que en la temporada de lluvias hubo un cambio, de 6.9 en la superficie hasta llegar a 6.4 en el fondo (Figura 8D).

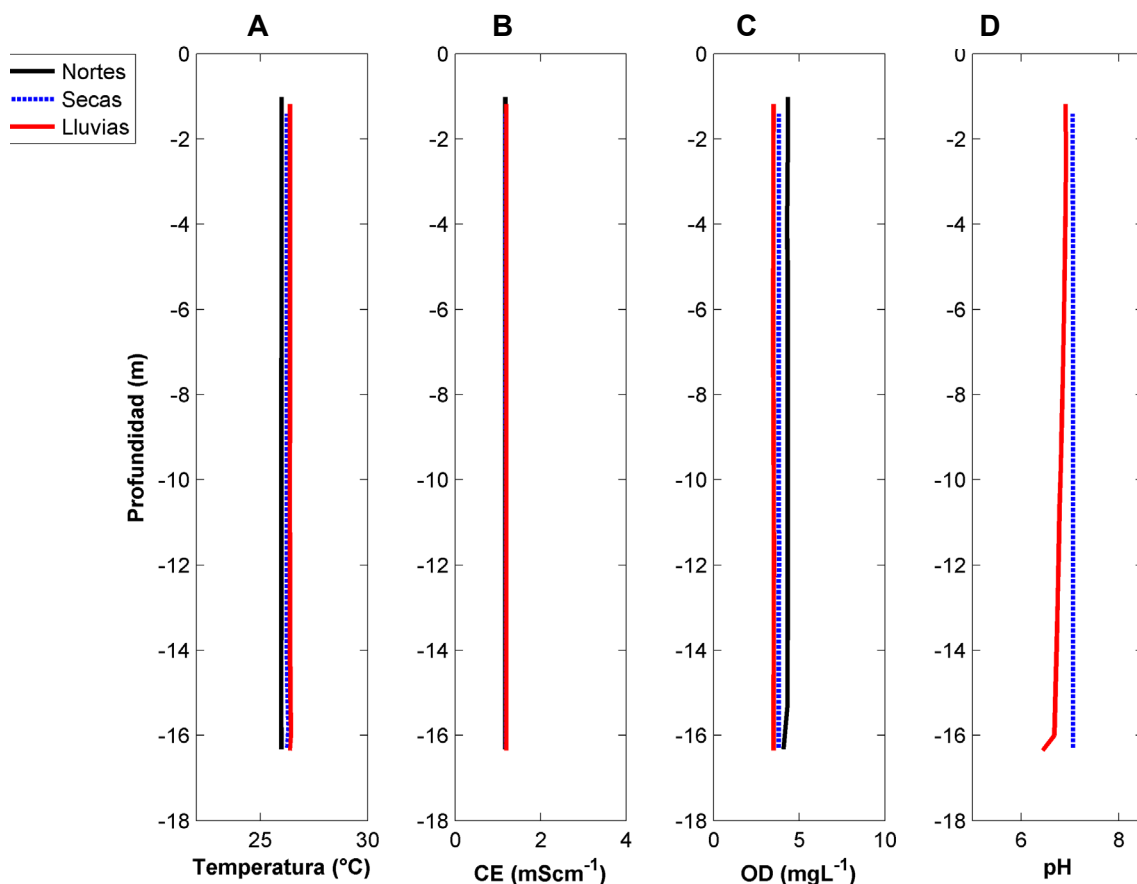


Figura 8. Cenote Noh Mozón, perfiles de temperatura (A), Conductividad (B), Oxígeno Disuelto (C) y pH (D) en temporada de nortes (línea negra), secas (línea punteada azul) y lluvias (línea roja).

En el cenote NYH (Figura 9), los perfiles se mantuvieron homogéneos a lo largo de la columna de agua. La temperatura tuvo una variación significativa entre las temporadas de nortes y lluvias ($p<0.05$) (Figura 9A), mientras que la CE presentó variaciones entre la temporada de secas y lluvias ($p<0.05$) (Figura 9B). La concentración de oxígeno mantuvo una variación menor a 0.5 mgL^{-1} entre temporadas, con diferencias entre la temporada de nortes y la de lluvias ($p<0.05$) (Figura 9C). En cuanto al pH la variación estacional no fue significativa ($p>0.05$) y los perfiles fueron homogéneos a lo largo de la columna de agua (Figura 9D).

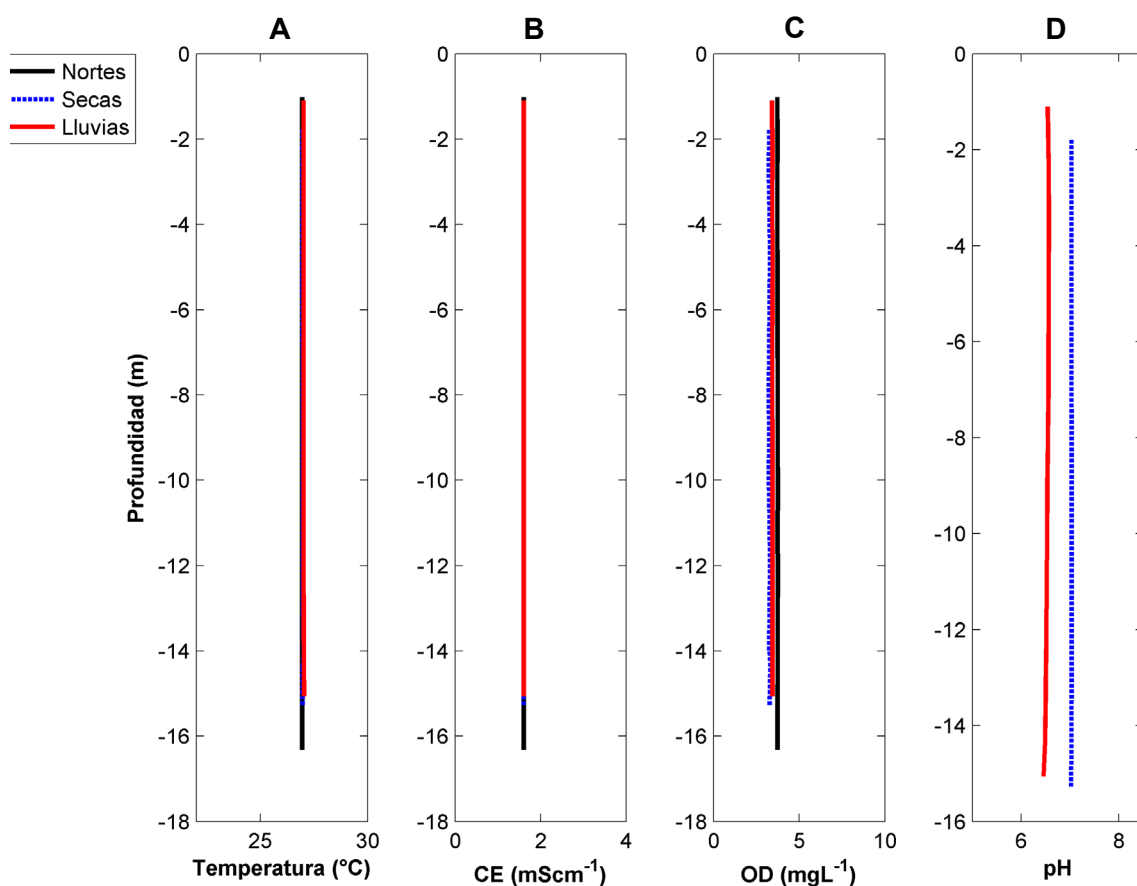


Figura 9. Cenote Nayáh, perfiles de temperatura (A), Conductividad (B), Oxígeno Disuelto (C) y pH (D) en temporada de nortes (línea negra), secas (línea punteada azul) y lluvias (línea roja).

El cenote SHN (Figura 10) tuvo cambios entre la temporada de nortes y la de lluvias en los parámetros medidos ($p<0.05$), se observó un incremento en la

temperatura conforme a las temporadas climáticas, pasando de 25.05 °C en nortes a 26.16 °C en lluvias (Figura 10A). La CE también presentó cambios estacionales entre la temporada de nortes y la de lluvias ($p<0.05$) con una distribución homogénea a lo largo de la columna de agua en todas las temporadas (Figura 10B). Con respecto a la concentración de oxígeno en las tres temporadas se mostró una disminución de la concentración en el fondo, la variación promedio entre temporadas fue menor a 0.5 mgL⁻¹ (Figura 10C). El pH pasó de 7 en temporada de secas a 6.2 en temporada de lluvias, en las dos temporadas no hubo cambios significativos a lo largo de la columna de agua (Figura 10D).

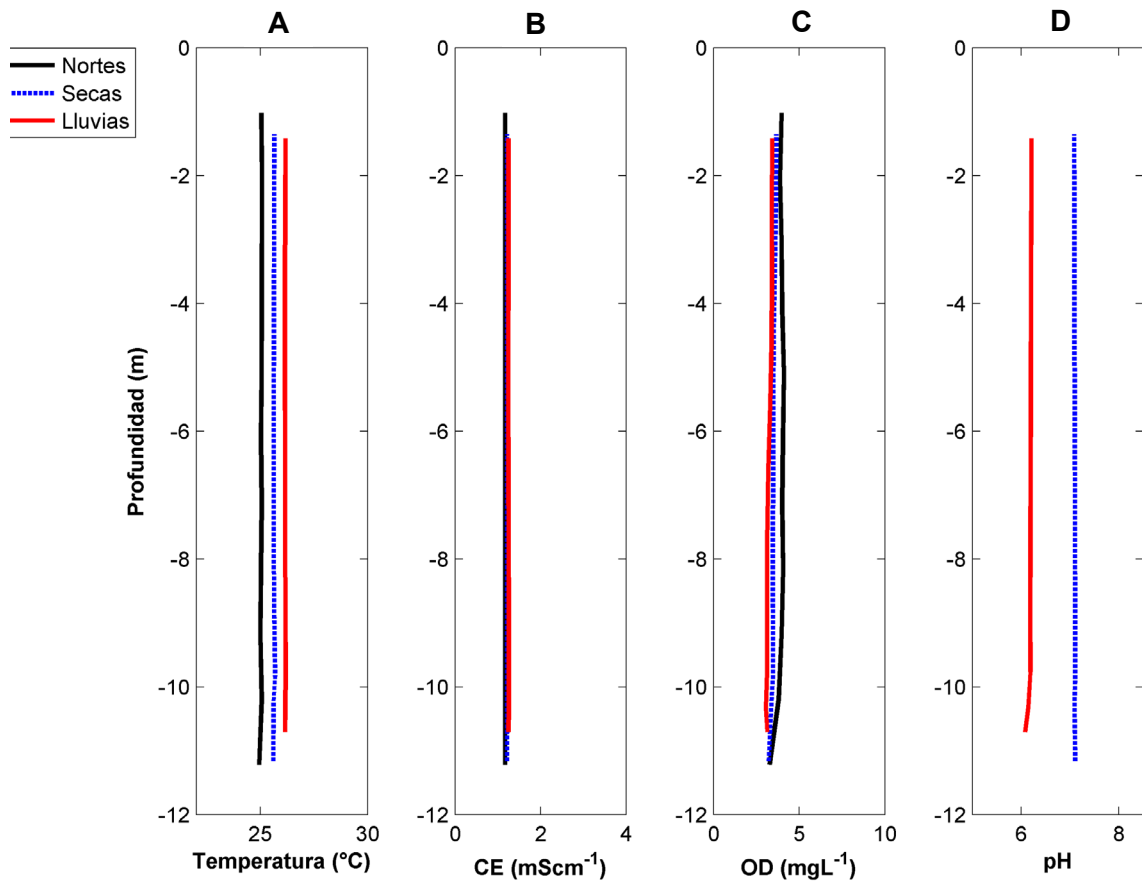


Figura 10. Cenote Suhen, perfiles de temperatura (A), Conductividad (B), Oxígeno Disuelto (C) y pH (D) en temporada de nortes (línea negra), secas (línea punteada azul) y lluvias (línea roja).

En la Tabla 6 se muestra un resumen de los datos obtenidos en los primeros tres metros de profundidad de cada cenote, para estimar los valores de las medias y las desviaciones estándar de cada parámetro discutido anteriormente.

Tabla 6. Resumen de resultados (media y desviación estándar) de los parámetros hidrológicos medidos en los primeros tres metros de profundidad.

	SITIO	TEMPERATURA (°C)			CE (mS·cm ⁻¹)			OD (mg·L ⁻¹)			pH	
		NORTES	SECAS	LLUVIAS	NORTES	SECAS	LLUVIAS	NORTES	SECAS	LLUVIAS	SECAS	LLUVIAS
ZA	UCL	26.08±0.003	26.20±0.004	26.45±0.272	1.7±0.0001	1.7±0.0001	1.72±0.009	3.42±0.002	3.20±0.001	3.00±0.109	7.6±0.036	5.99±0.002
	MDZ	25.38±0.0004	25.61±0.001	25.78±0.009	1.22±0.000	1.22±0.000	1.23±0.0001	3.79±0.010	3.35±0.003	2.92±0.092	7.8±0.001	6.39±0.006
	XAZ	24.46±0.013	25.59±0.012	26.42±0.008	1.14±0.0002	1.18±0.0004	1.18±0.001	4.70±0.034	4.85±0.031	2.92±0.191	6.6±0.003	6.1±0.025
	LKN	23.31±0.006	24.16±0.028	24.74±0.032	1.09±0.0002	1.11±0.009	1.11±0.019	3.74±0.004	3.73±0.427	2.87±0.420	7.4±0.0005	5.9±0.011
ZB	BE		29.43	30.01		1.59	1.88		5.59	2.35	7.4	5.9
	SM	26.04±0.022	27.25±0.536	28.09±0.444	1.6±0.031	1.54±0.019	1.40±0.031	2.19±0.863	0.35±0.383	0.09±0.003	7.1±0.003	6.8±0.034
	XS	26.92±0.049			2.14±0.005			6.41±0.286				
	XS2	26.83			1.65			10.00				
ZC	NMZ	25.98±0.003	26.22±0.003	26.38±0.001	1.18±0.0001	1.19±0.0001	1.19±0.0001	4.34±0.011	3.81±0.008	3.50±0.009	7.1±0.0006	6.9±0.005
	NYH	26.94±0.001	26.97±0.001	27.01±0.001	1.61±0.0004	1.61±0.000	1.61±0.0004	3.73±0.003	3.25±0.019	3.43±0.009	7.03±0.0006	6.6±0.014
	SHN	25.06±0.016	25.64±0.009	26.16±0.012	1.17±0.0004	1.22±0.001	1.25±0.001	3.94±0.053	3.63±0.052	3.42±0.013	7.09±0.004	6.2±0.002

7.2. Nutrientes

Se obtuvieron las concentraciones de nitrógeno y fósforo totales, inorgánicos y orgánicos para los cenotes estudiados. Las concentraciones obtenidas $\text{NO}_2 + \text{NO}_3$ se presentan como NO_x , y las de PO_4^{3-} como fósforo reactivo soluble (*PRS*). Las pruebas estadísticas no mostraron diferencias significativas entre temporadas en los cenotes dentro de cada zona de muestreo ($p > 0.05$). Considerando la media de las tres temporadas, se observaron diferencias significativas entre zonas ($p < 0.05$) en todos los parámetros con excepción del P_{Org} (Figura 11). Las concentraciones más altas de N_T se encontraron en las zonas A y C (Figura 11A). Al mismo tiempo estas dos zonas presentaron las concentraciones más bajas de P_T , con las menores variaciones (Figura 11B). La zona B tuvo las mayores variaciones con respecto a las otras dos zonas en las concentraciones de N_T y P_T . El N_T y el NO_x fueron diferentes entre las zonas A y B ($p < 0.01$), mientras que para el nitrógeno orgánico las diferencias se encontraron entre las zonas B y C ($p < 0.05$), mientras que las zonas A y C no tuvieron diferencias. El P_T no presentó diferencias significativas entre temporadas dentro de cada zona ($p > 0.05$), pero hubo diferencias entre las zonas B

y C ($p<0.05$) con los valores más altos en la zona B y los más bajos en la zona C. Finalmente, la concentración de *PRS* en la zona C presentó diferencias significativas con las zonas A y B ($p<0.01$) y para la fracción orgánica de fósforo no hubo diferencias significativas ($p>0.05$).

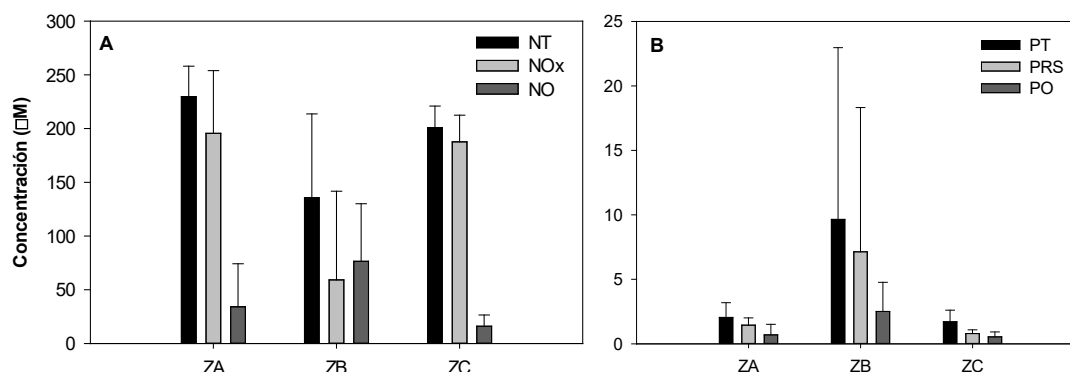


Figura 11. Concentración media ($\pm$ DE) de las distintas especies de N y P de los cenotes por zona considerando las tres temporadas. a) Nitrógeno Total, Nitrógeno inorgánico y Nitrógeno Orgánico y b) Fósforo Total, Fósforo Reactivo Soluble y Fósforo orgánico.

Considerando la concentración media de las tres temporadas en cada cenote se observó que el NT varió de $271.43 \pm 14.25 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (UCL, zona A) a $103.9 \pm 35.15 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (SM, zona B; Figura 12A), las concentraciones del NO_x variaron de $259.10 \pm 17.18 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ en UCL a $11.45 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ en XS2 (Figura 12C) mientras que la variación en la concentración del N_{Org} fue de $174.85 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ en XS2 a $10.55 \pm 9.17 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ en NYH (Figura 12E). Las concentraciones de NO_x fueron mayores en los cenotes de las zonas A y C, mientras que los cenotes de la zona B tuvieron las concentraciones más altas de N_{Org} , excepto por XS en donde NO_x fue la forma dominante de nitrógeno. Para todas las formas de fósforo analizadas, las variaciones fueron mínimas en las tres zonas, excepto en el cenote BE de la zona B que presentó la mayor concentración y también la mayor variabilidad en la concentración de P_T ($21.08 \pm 17.40 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$), *PRS* ($16.35 \pm 15.26 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) y P_{Org} ($4.73 \pm 2.19 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) (Figura 12). La menor concentración de P_T se detectó en el cenote NYH ($1.57 \pm 0.48 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$), mientras que las menores concentraciones de

PR_S y P_{Org} se encontraron en el cenote NMZ con $0.47 \pm 0.10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ y $0.21 \pm 0.23 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ respectivamente.

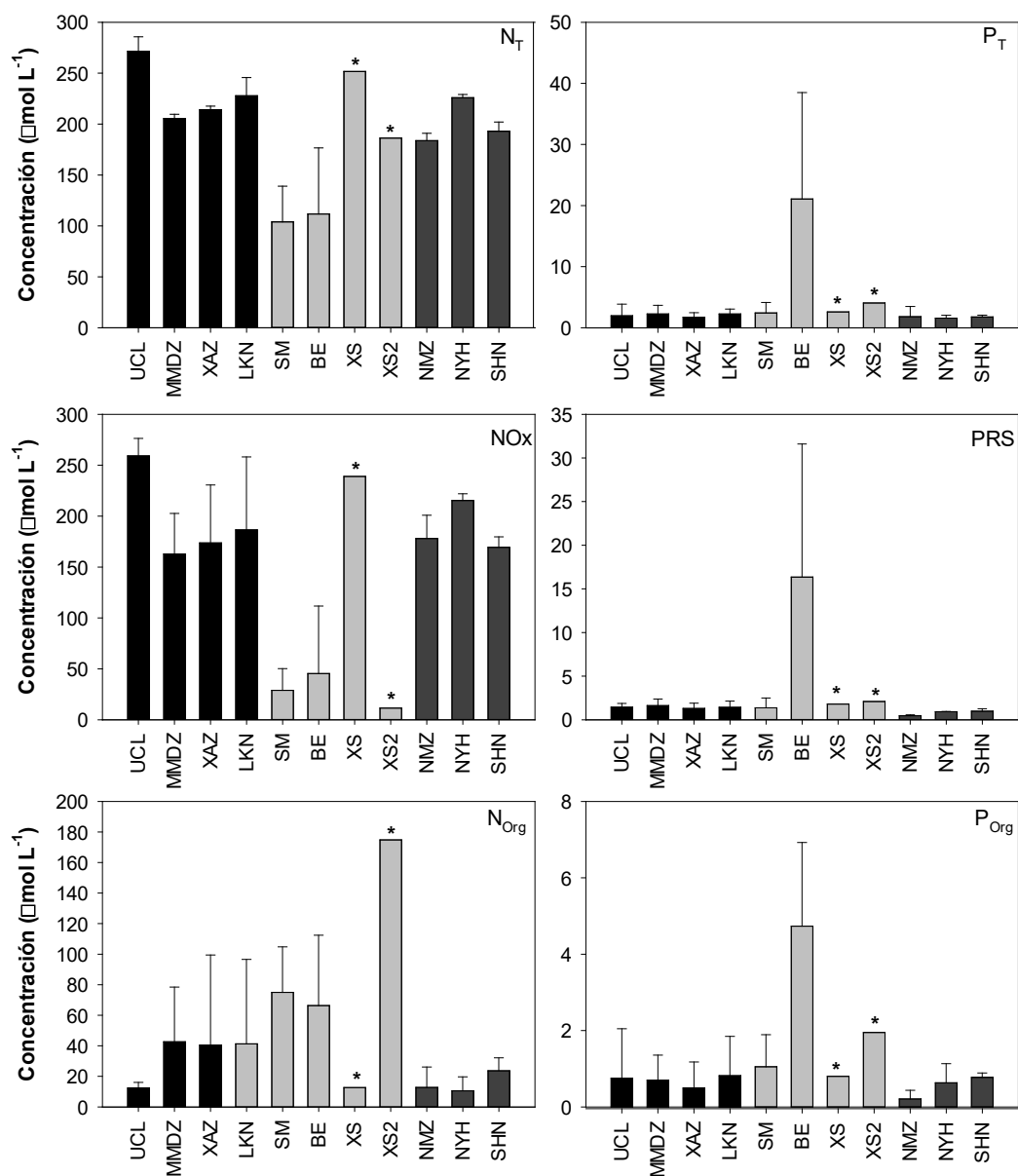


Figura 12. Concentración media ($\pm$ DE) de las distintas especies de N y P en cada cenote. La zona A en negro, zona B gris claro y zona C gris oscuro. Las barras con (*) corresponden a sitios en los que sólo se obtuvo una medición.

Aunque no existieron diferencias significativas entre temporadas dentro de cada zona, se encontraron algunos patrones en la concentración de los nutrientes que se describen a continuación.

En las zonas A y C se detectó una tendencia en la concentración de N_T (Figura 13) con valores altos en la temporada de lluvias (excepto XAZ en la zona A y NYH en la zona C) y los más bajos en la temporada de nortes, excepto, nuevamente, en el cenote XAZ, en donde la menor concentración se detectó en la temporada de secas. En la zona B el patrón anterior cambia: en los dos cenotes para los que se tienen los datos de temporalidad (SM y BE), las concentraciones más altas de N_T se detectaron en la temporada de nortes pero las concentraciones más bajas se presentaron en lluvias (SM) y secas (BE). Respecto a las concentraciones de NO_x , se observó que ésta fue la forma dominante de nitrógeno en los cenotes de las zonas A y C, en donde además se encontraron las concentraciones más altas en lluvias (excepto en los cenotes NYH zona C) y las más bajas en la temporada de nortes, SHN fue el único sitio que no cumplió ninguna de estas condiciones, ya que tuvo la mayor concentración en nortes y la menor en secas. Por el contrario, en la zona B, la temporada de lluvias presentó las concentraciones más bajas de NO_x , sin tener un patrón específico en las otras dos temporadas. En cuanto al N_{Org} , esta fue la forma dominante de nitrógeno en la zona B, excepto en XS. Los cenotes de la zona A, incluyendo SM (zona B) tuvieron la mayor concentración de N_{Org} en la temporada de nortes, con un gradiente temporal que presentó la menor concentración durante la temporada de lluvias, excepto en el cenote LKN y SM, en donde la menor concentración fue en secas. Los cenotes de la zona C, además de BE (zona B) tuvieron la mayor concentración de N_{Org} en lluvias.

Las concentraciones de fósforo no presentaron un patrón tan claro como el observado con el nitrógeno. La concentración de P_T tuvo un patrón estacional solo en dos de los cuatro cenotes de la zona A, los cenotes UCL y MDZ tuvieron el mismo patrón, un gradiente temporal con altas concentraciones en la temporada de nortes y las menores concentraciones en secas, los cenotes XAZ y LKN no tuvieron un

patrón estacional (Figura 13). En la zona B, la concentración más baja de P_T fue en la temporada de secas y para la zona C los cenotes NMZ y SHN, además de LKN (zona A) tuvieron un gradiente temporal, en donde la mayor concentración de P_T se observó en lluvias y la menor en nortes, aunque en el cenote NYH la mayor concentración fue en secas y la menor en lluvias. Respecto al *PRS*, dentro de la zona A los cenotes UCL y MDZ tuvieron las concentraciones más altas en nortes y las más bajas en lluvias, mientras que XAZ y LKN tuvieron las mayores en secas y las menores en nortes. En las zonas B y C no hubo un patrón estacional marcado. En las concentraciones de P_{Org} en la zona A nuevamente se agrupan UCL y MDZ con la mayor concentración en nortes y XAZ y LKN un gradiente de lluvias a secas de mayor a menor temperatura. En las zonas B y C no hay un gradiente estacional, sin embargo se encontró la mayor concentración en lluvias y secas respectivamente.

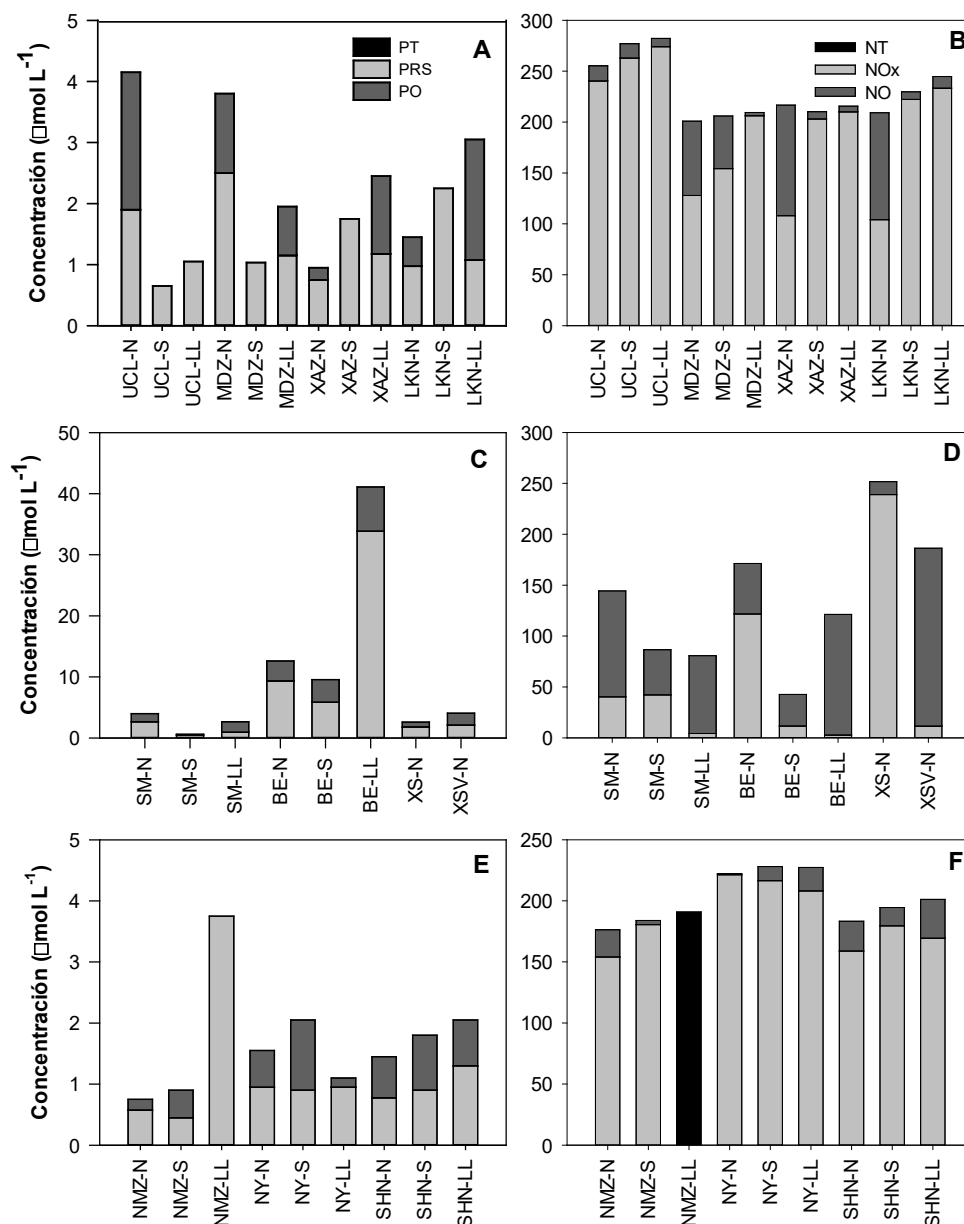


Figura 13. Concentración de nitrógeno total (N_T) y fósforo total (P_T) y sus respectivas fracciones orgánica e inorgánica dividido por zonas. Zona A (A, B), zona B (C,D), zona C (E,F).

Debido a que la variación entre temporadas dentro de cada una de las zonas no fue significativa, se usó la media de los tres valores obtenidos para determinar las relaciones N:P (Tabla 7), en dónde se encontró que todos los sitios con excepción de BE, rebasan los valores de la relación de Redfield (16:1), esto implica que los cenotes presentan limitación por fósforo, el valor más alto se encontró en el

cenote NYH (144.17) y el más bajo en Buena Esperanza (5.30), que, de acuerdo a los datos presentados, sería el único cenote limitado por nitrógeno.

Tabla 7. Resumen de resultados (media y desviación estándar) de las concentraciones de nutrientes de cada cenote durante las tres temporadas muestreadas.

ZONA	SITIO	NT ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	NOx ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	Norg ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	PT ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	PRS ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	Porg ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	N:P (NT:PT)	NO/NT
A	UCL	271.43 $\pm$ 14.25	259.10 $\pm$ 17.18	12.33 $\pm$ 3.71	1.95 $\pm$ 1.92	1.44 $\pm$ 0.43	1.13 $\pm$ 1.59	139.20	0.05
	MDZ	205.41 $\pm$ 4.25	162.77 $\pm$ 39.84	42.64 $\pm$ 35.81	2.26 $\pm$ 1.41	1.62 $\pm$ 0.76	1.05 $\pm$ 0.35	90.85	0.21
	XAZ	214.13 $\pm$ 3.48	173.69 $\pm$ 56.93	40.44 $\pm$ 58.97	1.72 $\pm$ 0.75	1.29 $\pm$ 0.61	0.74 $\pm$ 0.76	124.74	0.19
	LKN	227.83 $\pm$ 17.82	186.53 $\pm$ 71.60	41.30 $\pm$ 55.24	2.25 $\pm$ 0.80	1.43 $\pm$ 0.71	0.82 $\pm$ 1.03	101.26	0.18
B	SM	103.90 $\pm$ 35.15	28.93 $\pm$ 21.35	74.97 $\pm$ 29.85	2.42 $\pm$ 1.71	1.37 $\pm$ 1.13	1.05 $\pm$ 0.84	42.99	0.72
	BE	111.68 $\pm$ 64.88	45.38 $\pm$ 66.33	66.30 $\pm$ 46.14	21.08 $\pm$ 17.40	16.35 $\pm$ 15.26	4.73 $\pm$ 2.19	5.30	0.59
	XS	251.7	239.00	12.70	2.60	1.80	0.8	96.81	0.05
	XS2	186.3	11.45	174.85	4.05	2.10	1.95	46.00	0.94
C	NMZ	183.85 $\pm$ 7.28	178.07 $\pm$ 22.85	12.76 $\pm$ 13.38	1.80 $\pm$ 1.69	0.47 $\pm$ 0.10	0.31 $\pm$ 0.19	102.04	0.07
	NYH	225.87 $\pm$ 3.15	215.32 $\pm$ 6.67	10.55 $\pm$ 9.17	1.57 $\pm$ 0.48	0.93 $\pm$ 0.03	0.63 $\pm$ 0.50	144.17	0.05
	SHN	192.98 $\pm$ 9.02	169.31 $\pm$ 10.29	23.68 $\pm$ 8.42	1.77 $\pm$ 0.30	0.99 $\pm$ 0.27	0.78 $\pm$ 0.11	109.24	0.12

7.3. Abundancia de fitoplancton

Se identificaron cinco grupos taxonómicos de fitoplancton mediante conteos: bacilariofitas, clorofitas, criptofitas, cianobacterias y dinoflagelados, en un total de 29 muestras. La abundancia total encontrada en los cenotes se expresó en escala logarítmica (Figura 14) debido a la gran variabilidad encontrada en los sitios. Se contabilizaron por separado colonias y células individuales, éstas últimas incluyendo los filamentos. Los conteos se expresaron en $\text{cél}\cdot\text{L}^{-1}$ para las células solitarias y en $\text{col}\cdot\text{L}^{-1}$ para las colonias. Se consideraron colonias a los conglomerados compuestos por células coccas de cianobacterias, probablemente de los géneros de cianobacterias *Microcystis* y/o *Aphanocapsa* en los cenotes del rancho XS y SM, además de *Merismopedia* en BE y clorofitas del orden de las *Chlorococcales*. Las colonias solo se registraron en los cenotes de las zonas A (en baja proporción) y B, mientras que en la zona C sólo se encontraron células solitarias. Los análisis estadísticos no mostraron diferencias significativas de la abundancia de fitoplancton entre temporadas ($p>0.05$) en los cenotes de la misma zona ni en términos de $\text{cél}\cdot\text{L}^{-1}$

¹ ni en $\text{col}\cdot\text{L}^{-1}$, pero si hubo diferencias entre zonas, ya que la zona B presentó la mayor abundancia ($p=0.001$) de células y colonias. La menor abundancia correspondió al cenote NYH (zona C) durante las temporadas de lluvias ($50 \text{ cel}\cdot\text{L}^{-1}$) y nortes ($100 \text{ cel}\cdot\text{L}^{-1}$), mientras que las abundancias más altas se encontraron en el cenote BE en la temporada de lluvias con un valor de $6.31 \times 10^9 \text{ cel}\cdot\text{L}^{-1}$ y $3.31 \times 10^9 \text{ col}\cdot\text{L}^{-1}$.

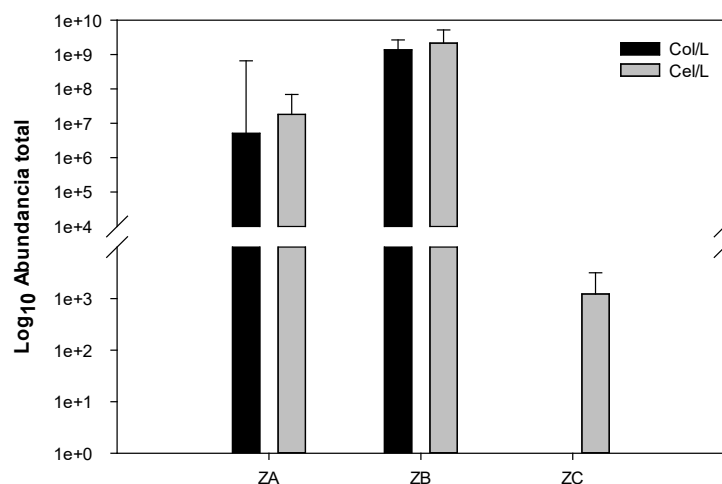


Figura 14. Abundancia total de fitoplancton en células por litro y colonias por litro en escala logarítmica. Ambas medidas son excluyentes, esto es, las células de las colonias no se contabilizaron individualmente, y en la abundancia presentada como $\text{cel}\cdot\text{L}^{-1}$ no se tomaron en cuenta las células de las colonias.

Las abundancias totales por grupo de fitoplancton no presentaron diferencias significativas entre temporadas ($p>0.05$), excepto para los dinoflagelados dentro de la zona A, que fueron significativamente más abundantes en lluvias ($p<0.05$). Los análisis hechos por zonas mostraron que la abundancia de diatomeas fue significativamente mayor en la zona B ($p<0.01$) aunque este grupo estuvo presente en todos los sitios y fue el mejor representado en los cenotes con baja abundancia de las zonas A (MMZ y UCL) y C (Figura 15A). Las clorofitas, que únicamente estuvieron ausentes en UCL, presentaron diferencias entre las zonas B y C ($p<0.05$), siendo significativamente mayores en la zona B (Figura 15B), al igual que las colonias de cianobacterias que también resultaron significativamente mayores en esta misma zona (zona B) ($p<0.001$), ya que en la zona C no estuvieron

presentes (Figura 15F). Por su parte las criptofitas, dinoflagelados y cianobacterias filamentosas no mostraron diferencias significativas entre zonas ($p>0.05$).

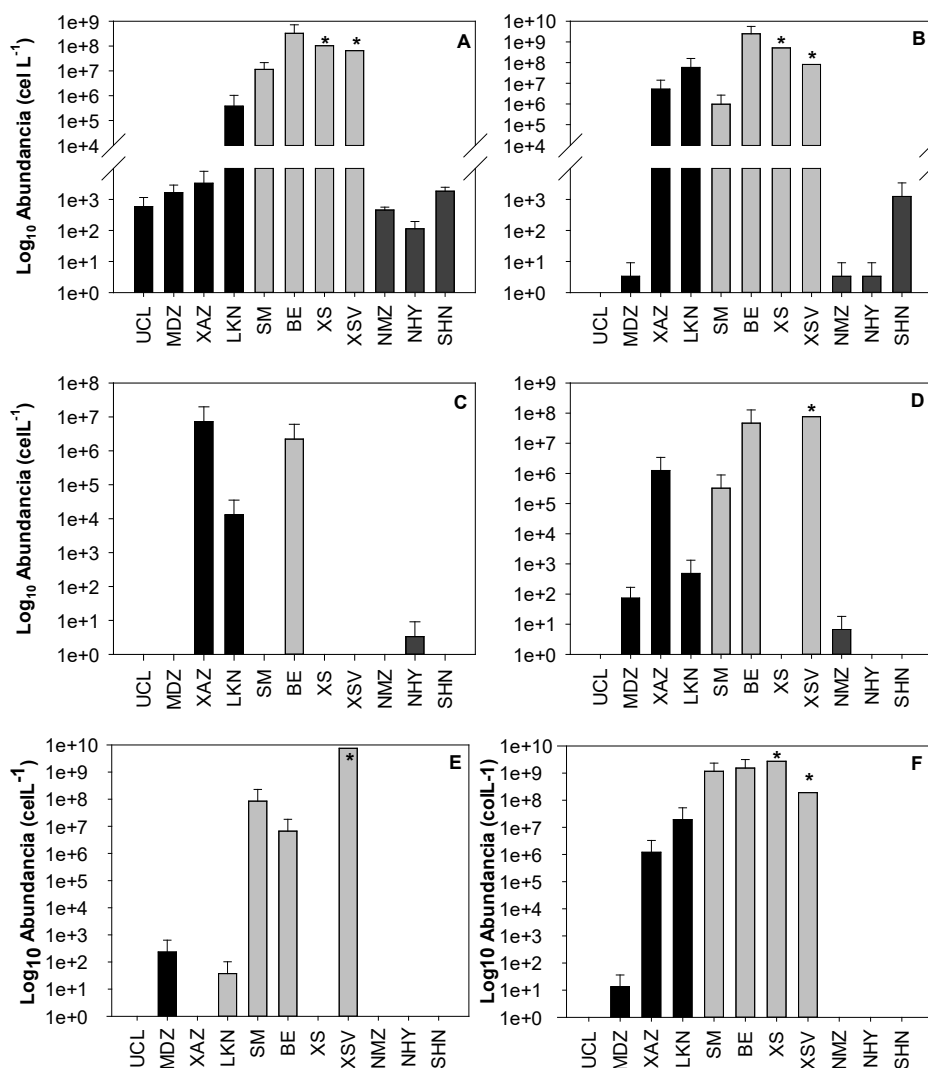


Figura 15. Abundancia total por grupo de fitoplancton en escala logarítmica, A) Diatomeas, B) Clorofitas, C) Criptofitas, D) Dinoflagelados, E) Cianobacterias ($\text{cel}\cdot\text{L}^{-1}$) y F) Cianobacterias coloniales ($\text{col}\cdot\text{L}^{-1}$). (*) Única medición de la temporada de nortes. Zona A en color negro, zona B gris claro y zona C gris oscuro.

Dentro de la zona A los cenotes UCL y MDZ y estuvieron dominados por diatomeas ($>75\%$) y tuvieron las abundancias más altas en la temporada de nortes ($1.2\times 10^3 \text{ cel}\cdot\text{L}^{-1}$ y $2.2\times 10^3 \text{ cel}\cdot\text{L}^{-1}$ respectivamente) y las más bajas en la temporada de lluvias (1.2×10^2 y $2.3\times 10^2 \text{ cel}\cdot\text{L}^{-1}$). Particularmente, en el cenote UCL de la zona

A, las diatomeas fueron el único grupo identificado durante las tres temporadas de muestreo. En el cenote MDZ durante la temporada de nortes hubo una abundancia de clorofitas equivalente al 23.3% de la abundancia total, para la temporada de secas las clorofitas desaparecieron y en su lugar aparecieron algunos dinoflagelados que alcanzaron hasta el 7% de la abundancia, finalmente en la temporada de lluvias, la abundancia de dinoflagelados se incrementó a un 14.2%. Por el contrario, los otros dos cenotes de esta misma zona (XAZ y LKN), las abundancias más bajas se presentaron en la temporada de nortes: $2.01 \times 10^4 \text{ cel} \cdot \text{L}^{-1}$ y $4.05 \times 10^2 \text{ cel} \cdot \text{L}^{-1}$ respectivamente. En estos mismos cenotes también dominaron las diatomeas durante los nortes (43.53% y 72.22%), posteriormente, en la temporada de secas las criptofitas y las clorofitas constituyeron el 98.3% de la abundancia total y en LKN se observó un *bloom* de criptofitas, que contribuyó con el 99% de la abundancia.

En la zona B, los cenotes San Miguel y Buena Esperanza tuvieron el mismo patrón estacional, esto es, la menor abundancia en la temporada de nortes, un incremento en la temporada de secas y finalmente la mayor abundancia en lluvias. Las abundancias de las colonias de cianobacterias en SM tuvieron su menor valor en nortes (4.59×10^8) y aumentaron en un orden de magnitud en lluvias (2.51×10^9). Este mismo patrón se observó en el cenote BE con $1.50 \times 10^8 \text{ col} \cdot \text{L}^{-1}$ en nortes y $3.31 \times 10^9 \text{ col} \cdot \text{L}^{-1}$ en lluvias.

En cuanto a las células contabilizadas individualmente, el grupo más abundante fue el de las diatomeas en SM pero sólo en nortes (78.26%) y secas (~100%), mientras que en lluvias aparecen las cianobacterias filamentosas que alcanzaron una abundancia del 100% con $2.52 \times 10^8 \text{ cél} \cdot \text{L}^{-1}$. En tanto, en BE las clorofitas fueron el grupo dominante durante las temporadas de nortes (87.3%) y lluvias (96.5%). En secas el grupo dominante fue el de las diatomeas (61.7%).

De los dos cenotes que se encuentran dentro del rancho X-Labón Subín no se pudieron obtener muestras de las tres temporadas, sin embargo, en ambos, las

cianobacterias constituyeron el grupo dominante, en el primer cenote fueron las *Chroococcales* ($2.72 \times 10^9 \text{ col} \cdot \text{L}^{-1}$) y en el cenote XS2 las colonias alcanzaron un valor de $1.91 \times 72 \times 10^8 \text{ col} \cdot \text{L}^{-1}$ mientras que los filamentos tuvieron una abundancia de $7.48 \times 10^9 \text{ cel} \cdot \text{L}^{-1}$).

La zona C presentó las abundancias más bajas, (entre 50 y 6,120 $\text{cel} \cdot \text{L}^{-1}$), en NYH y SHN la mayor abundancia se observó en la temporada de secas y la menor en lluvias. Por el contrario, NMZ tuvo la mayor abundancia en lluvias y la menor en nortes. Las diatomeas fueron el grupo dominante en todas los sitios, excepto en Suhen en la temporada de secas, en donde las clorofitas contribuyeron con el 61% de la abundancia (en esta muestra se encontraron muchos restos de materia vegetal que dificultaron el conteo, esto puede significar que se haya subestimado la presencia de otros grupos con células de menor tamaño); durante la temporada de nortes y lluvias las diatomeas fueron el único grupo encontrado en este mismo cenote.

Tabla 8. Abundancia total de los cenotes en $\text{cel} \cdot \text{L}^{-1}$ y $\text{col} \cdot \text{L}^{-1}$, y abundancia relativa por grupos obtenida mediante análisis quimiotaconómico.

Zona	Cenote	Temporada	Conteos			Análisis Quimiotaconómico			
			Chl a ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	Densidad ($\text{cel} \cdot \text{L}^{-1}$)	Densidad ($\text{col} \cdot \text{L}^{-1}$)	Diato (%)	Cloro (%)	Cripto (%)	Ciano (%)
A	UCL	Nortes	0.035	1.21E+03		100	0.00	0.00	0.00
		Secas	0.080	1.20E+02		58.50	38.86	0.07	2.57
		Lluvias	0.033	4.40E+02		100	0.00	0.00	0.00
	MDZ	Nortes	0.035	2.96E+03	4.00E+01	97.99	1.21	0.67	0.13
		Secas	0.178	2.70E+03		20.76	79.08	0.17	0.00
		Lluvias	0.144	2.80E+02		22.31	76.23	0.00	1.46
	XAZ	Nortes	1.607	2.11E+04	1.00E+03	29.38	24.19	28.35	18.08
		Secas	2.429	1.04E+05	3.00E+04	18.71	36.75	26.40	18.14
		Lluvias	2.468	4.47E+07	3.61E+06	22.22	28.74	31.59	17.45
	LKN	Nortes	0.394	4.05E+02		55.66	26.89	17.06	0.39
		Secas	7.919	2.33E+08	5.76E+07	31.46	1.71	66.62	0.22
		Lluvias	1.200	5.13E+04		29.61	15.68	52.72	1.99
B	SM	Nortes	13.878	4.81E+08	4.59E+08	1.01	20.25	0.38	78.37
		Secas	8.309	5.35E+08	5.18E+08	0.90	15.23	0.00	83.87
		Lluvias	38.910	2.76E+09	2.51E+09	0.41	0.65	0.59	98.36
	BE	Nortes	8.193	1.09E+09	1.50E+08	4.65	33.11	5.94	56.30

		Secas	8.972	2.38E+09	1.13E+09	29.69	7.84	11.17	51.30
		Lluvias	48.398	9.62E+09	3.31E+09	4.73	15.27	6.90	73.11
	XS	Nortes	2.445	3.34E+09	2.72E+09	5.63	61.08	22.64	10.65
	XS2	Nortes	23.172	7.89E+09	1.91E+08	0.00	0.00	13.62	86.38
C	NMZ	Nortes	0.252	3.40E+02		100.00	0.00	0.00	0.00
		Secas	0.805	4.80E+02		89.26	10.74	0.00	0.00
		Lluvias	0.635	5.80E+02		82.92	17.08	0.00	0.00
	NYH	Nortes	0.000	1.00E+02		0.00	0.00	0.00	0.00
		Secas	0.014	2.10E+02		99.25	0.45	0.25	0.05
		Lluvias	0.001	5.00E+01		0.00	0.00	0.00	0.00
	SHN	Nortes	0.996	1.97E+03		63.85	24.98	0.09	11.07
		Secas	1.532	6.12E+03		38.03	19.52	40.40	2.06
		Lluvias	0.726	1.17E+03		41.15	23.35	11.95	23.55

7.4. Pigmentos fotosintéticos

El análisis quimiotaxonómico de las poblaciones de fitoplancton se realizó con el software CHEMTAX, siguiendo las observaciones hechas por (*Higgins et al.*, 2011). Con los pigmentos identificados mediante HPLC, se obtuvo la matriz de pigmentos empleada para el análisis quimiotaxonómico, en el que se detectaron cuatro grupos principales de fitoplancton: Diatomeas (fucoxantina), clorofitas (chl b), criptofitas (alloxantina), y cianobacterias (zeaxantina) (Tabla 9).

Tabla 9. Matriz de concentración de pigmentos fotosintéticos usados para la identificación con CHEMTAX.

Zona	Sitio	Fucoxantina [$\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$]	Alloxantina [$\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$]	Zeaxantina [$\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$]	Chl b [$\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$]	Chl a [$\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$]
A	UCL-N	0.000	0.000	0.000	0.000	0.035
	UCL-S	0.030	0.000	0.004	0.019	0.080
	UCL-L	0.000	0.000	0.000	0.000	0.033
	MDZ-N	0.016	0.000	0.000	0.000	0.035
	MDZ-S	0.018	0.000	0.000	0.082	0.178
	MDZ-L	0.027	0.000	0.006	0.065	0.144
	XAZ-N	0.251	0.104	0.312	0.294	1.607
	XAZ-S	0.253	0.178	0.502	0.741	2.429
	XAZ-L	0.566	0.542	0.614	0.471	2.468
	LKN-N	0.109	0.002	0.000	0.042	0.394
	LKN-S	1.429	1.663	0.000	0.041	7.919

	LKN-L	0.208	0.202	0.026	0.092	1.200
	SM-N	0.231	0.000	0.840	1.874	13.878
	SM-S	0.192	0.000	1.342	0.889	8.309
	SM-L	0.000	0.000	1.852	0.000	38.910
B	BE-N	1.067	0.196	1.616	2.207	8.193
	BE-S	7.445	0.413	2.002	0.509	8.972
	BE-L	6.816	1.418	12.811	6.954	48.398
	XS-N	0.079	0.185	0.314	1.038	2.445
	XS2-N	0.387	1.481	9.993	0.000	23.172
C	NMZ-N	0.178	0.000	0.000	0.000	0.252
	NMZ-S	0.530	0.000	0.000	0.056	0.805
	NMZ-L	0.408	0.000	0.000	0.072	0.635
	NYH-N	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
	NYH-S	0.008	0.000	0.000	0.000	0.014
	NYH-L	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
	SHN-N	0.397	0.000	0.210	0.148	0.996
	SHN-S	0.528	0.390	0.066	0.159	1.532
	SHN-L	0.280	0.021	0.365	0.102	0.726

Las pruebas estadísticas mostraron que existieron diferencias significativas en la concentración de Chl *a* entre zonas (Figura 16A), en dónde la zona B resultó tener la mayor concentración de Chl *a* ($p < 0.01$). No hubo diferencias significativas entre temporadas dentro de cada zona ($p > 0.05$), aunque se observó un incremento en la temporada de secas en los cenotes de las zonas A y C, mientras que en la zona B la mayor concentración fue en la temporada de lluvias (Figura 16B). Las concentraciones más baja de Chl *a* correspondieron al cenote NYH durante las temporadas de nortes y lluvias con valores inferiores a $0.001 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, mientras que la concentración más alta de Chl *a* se encontró en BE durante la temporada de lluvias con $48.40 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

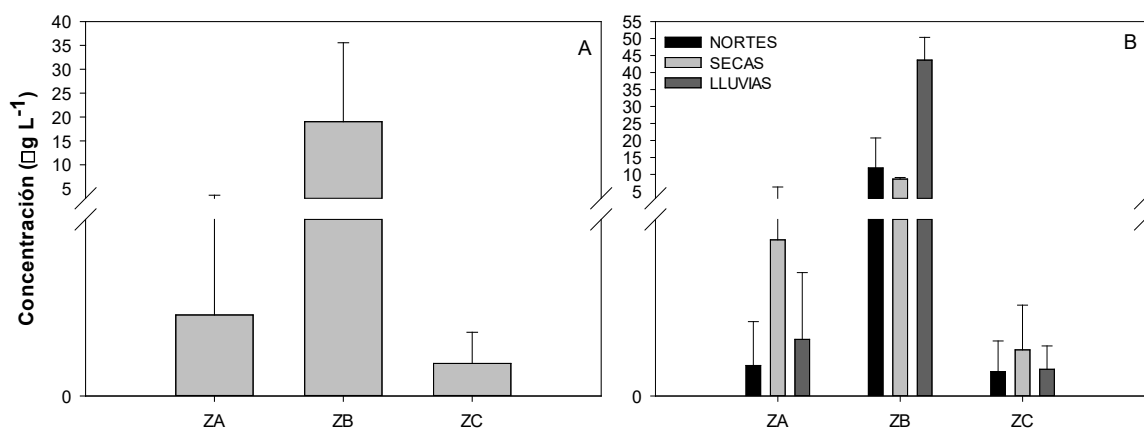


Figura 16. Concentración de Chl a (media $\pm$ DE) en los cenotes muestreados, a) agrupados por zonas y b) por temporadas dentro de cada zona.

La contribución de los grupos fitoplanctónicos estimados mediante CHEMTAX a la concentración de Chl a (Figura 17), no mostraron diferencias significativas entre temporadas en ninguno de los cuatro grupos identificados ($p > 0.5$), y con respecto a las diferencias entre zonas, solo las clorofitas y las cianobacterias tuvieron diferencias significativas entre las zonas A y B ($p < 0.05$), en tanto que la aportación de las cianobacterias fue significativamente más alta en la zona B ($p < 0.001$). En los cenotes con concentraciones menores a $1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (UCL, MDZ, NMZ, NYH, SHN-N y SHN-LL) sólo se encontraron diatomeas y clorofitas (Figura 18C, D), excepto el cenote SHN que tuvo concentraciones cercanas a $1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, en donde además se encontraron criptofitas y cianobacterias. Los cenotes de la zona B, que tuvieron las concentraciones más altas de Chl a (por encima de $7 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) estuvieron dominados por cianobacterias y criptofitas, mientras que las diatomeas y las clorofitas estuvieron presentes con menores aportaciones. Finalmente, los cenotes que tuvieron concentraciones entre 1 y $7 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ tuvieron una aportación mayor de clorofitas y criptofitas, en proporciones similares (Figura 18A, C).

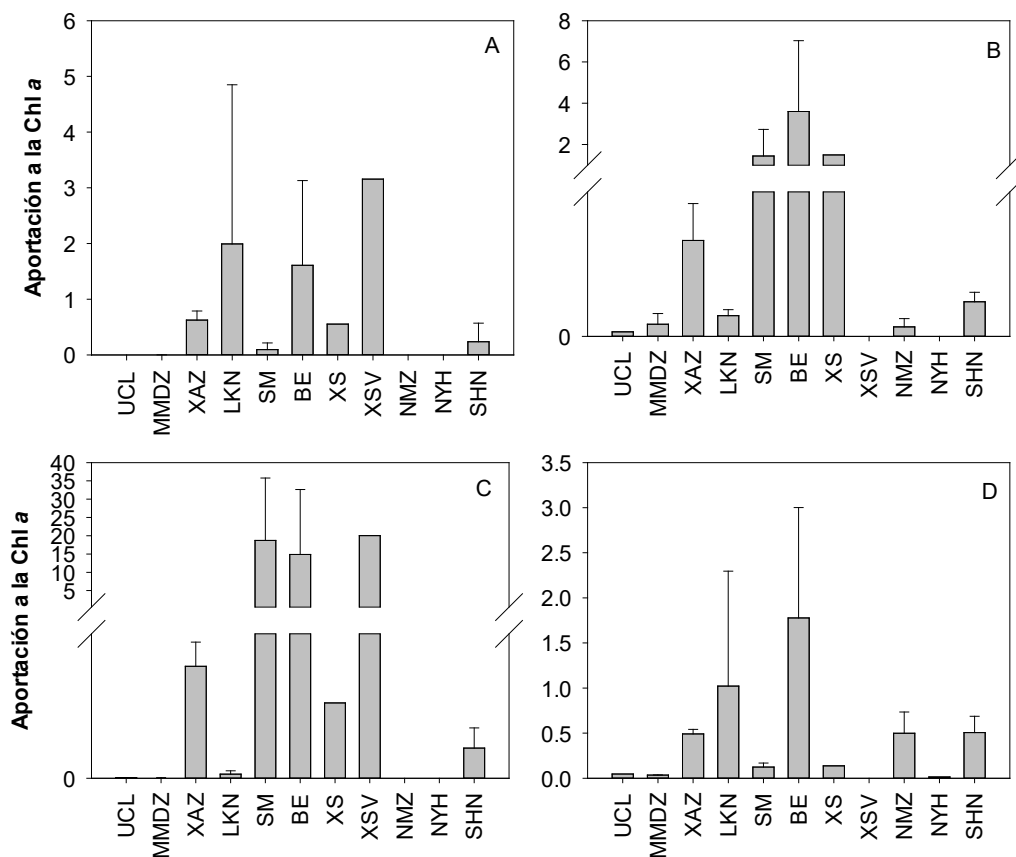


Figura 17. Contribución de cada grupo fitoplanctónico a la concentración total de Chl *a*. A) Criptofitas, B) Clorofitas, C) Cianobacterias y D) Diatomeas.

A pesar de no haber diferencias estadísticas entre temporadas para la concentración de Chl *a* y para la contribución de los grupos fitoplanctónicos, en algunos cenotes se pudieron observar variaciones estacionales tanto de la concentración total de Chl *a* como de la aportación de los diferentes grupos fitoplanctónicos. En los cenotes de la zona A los cenotes presentaron la mayor concentración de Chl *a* en la temporada de secas, excepto XAZ que tuvo la mayor concentración en la temporada de lluvias. Con respecto a los grupos de fitoplancton, UCL y MDZ que son los cenotes con menor concentración de Chl *a*, estuvieron dominados por diatomeas y clorofitas, con presencia de cianobacterias en menor proporción (<3%) en una sola temporada. En los cenotes XAZ y LKN, además de las diatomeas y las clorofitas, aparecieron las criptofitas en todas las temporadas, en el cenote LKN representaron al grupo más abundante (>50%) durante secas y

lluvias, mientras que el cenote XAZ tuvieron la distribución más homogénea de todos los grupos identificados.

En los cenotes de la zona B las cianobacterias representaron más del 50% de la abundancia, excepto en XS que estuvo dominado por clorofitas (61%), además el grupo con la menor abundancia fueron las diatomeas, que representaron menos del 30% de la abundancia, y en algunos casos tuvieron abundancias cercanas a 0%, como en el caso de SM y XS2. La variación estacional en SM y BE presentó el mismo patrón; altas concentraciones en lluvias, posteriormente disminuye en nortes y finalmente la menor concentración se encontró en secas. Finalmente, los cenotes de la zona C, tuvieron la menor concentración de Chl *a* en la temporada de lluvias. En el cenote NYH, que tuvo la menor concentración de Chl *a*, las diatomeas fueron el único grupo identificado en la única temporada que se pudo estimar (secas). NMZ estuvo dominado por diatomeas durante las tres temporadas, sin embargo en la temporada de nortes representaron el 100% de la abundancia, posteriormente en secas y lluvias aparecieron las clorofitas con un 10.74% y 17.08% respectivamente. El cenote SHN estuvo dominado por diatomeas en la temporada de nortes (63.85%), para la temporada de secas la abundancia de diatomeas disminuyó y aparecieron las criptofitas que resultaron ser el grupo dominante esa temporada (40.40%), y en la temporada de lluvias disminuyó la abundancia de criptofitas (11.95%) y se incrementó la de las cianobacterias (23.55), aunque el grupo dominante volvieron a ser las diatomeas (41.15%).

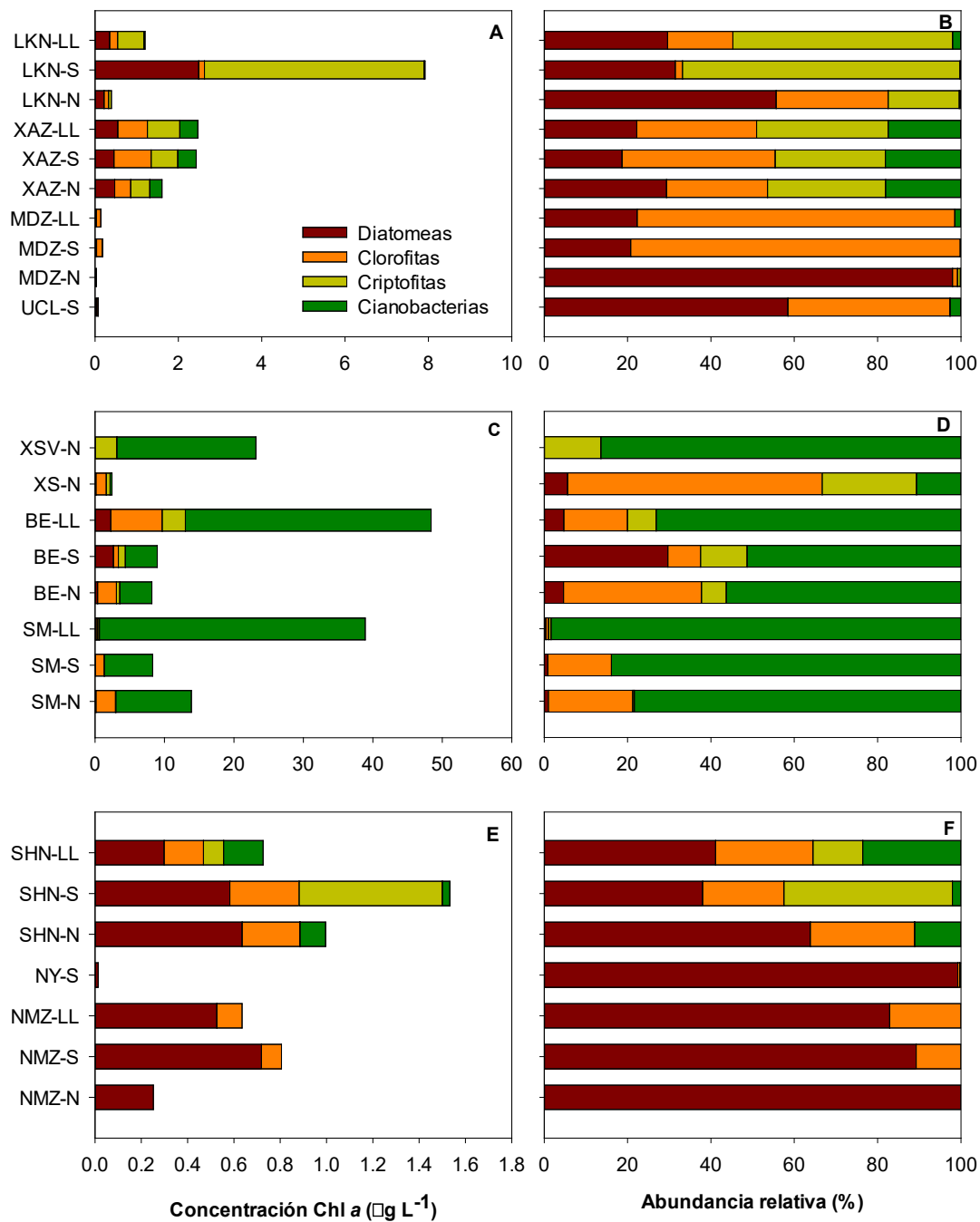


Figura 18. Proporción de grupos fitoplanctónicos por cenote y por temporada (izquierda) y abundancia relativa por cenote y por temporada dentro de cada zona. A y B zona A, C y D zona B, E y F zona C. Los cenotes UCL (zona A) y NYH (zona C) solo tuvieron presencia de Chl a en los cromatogramas, por lo que se asume que están compuestos por diatomeas en su totalidad.

7.5. Índices de Estado Trófico

Para facilitar la identificación del estado trófico de los cenotes, se utilizó una escala de colores, asignando un color a cada estado trófico (Tabla 10). Se usó la misma escala de color en ambos casos Carlson (1977) y OECD (1982).

Tabla 10. Escala de color para la señalización del estado trófico.

Clave de color	Estado trófico
	Ultraoligotrófico
	Oligotrófico
	Mesotrófico
	Eutrófico
	Hipereutrófico

Los valores del estado trófico obtenidos mediante el TSI de Carlson (Tabla 11), mostraron, en el caso de la clorofila, cuatro cenotes no tuvieron cambios estacionales, UCL y MDZ de la zona A, además de NYH y SHN de la zona C, los tres primeros fueron ultraoligotróficos y el último oligotrófico, por otro lado XAZ y LKN (zona A) tuvieron cambios estacionales, pasando de la oligotrofia en nortes, en el caso de XAZ posteriormente pasó a un estado mesotrófico en secas y lluvias, y LKN por su parte, en secas presentó un estado eutrófico y en lluvias fue oligotrófico nuevamente, cabe destacar que ambos cenotes son abiertos y en el caso de LKN tuvo un *Bloom* de criptofitas en secas. En la zona B, los cenotes SM y BE pasaron de un estado eutrófico en nortes y secas, a hipereutrófico en lluvias. En los cenotes del rancho XS el primer cenote tuvo un estado mesotrófico, mientras que el cenote XS2 resultó hipereutrófico, todos estos cenotes son abiertos con el lente de agua al nivel del suelo y se encuentran en ranchos ganaderos. Finalmente en la zona C, NMZ fue el único cenote con cambios estacionales, aunque no rebasó la oligotrofia.

En el TSI calculado mediante la concentración de PT (Tabla 11), todos los cenotes resultaron eutróficos o hipereutroficos. En la zona A, solo UCL en secas y XAZ en la de nortes resultaron ser eutróficos, todos los demás se clasificaron como hipereutróficos; en la zona B, SM en secas fue el único cenote con un estado

eutrófico, el resto fueron hipereutróficos, y de la zona C, SHN y NYH resultaron hipereutróficos en todas las temporadas, mientras que NMZ solo en lluvias, ya que durante nortes y secas el resultado fue eutrófico.

Tabla 11. Estado trófico de los cenotes estudiados estimado mediante el TSI de Carlson, para clorofila y fósforo total durante la temporada de nortes, lluvias y secas. Celdas vacías sin disponibilidad de datos.

ZONA	SITIO	TSI (Chl <i>a</i>)			TSI (PT)		
		NORTES	SECAS	LLUVIAS	NORTES	SECAS	LLUVIAS
A	UCL	7	15	6	90	64	71
	MDZ	7	23	21	89	70	79
	XAZ	44	48	48	69	78	83
	LKN	30	60	41	75	82	86
B	SM	65	60	76	90	62	84
	BE	60	61	78	106	102	123
	XS	48			84		
	XS2	70			90		
C	NMZ	26	37	35	66	68	89
	NYH	0	-2	-33	76	80	71
	SHN	40	44	36	75	78	80

Para los valores dados por la OECD, con respecto a la concentración de clorofila (Tabla 12), en la zona A, UCL y MDZ nuevamente fueron ultraoligotróficos sin cambios estacionales, mientras que XAZ resultó oligotrófico en las tres temporadas. En el caso de LKN tuvo la mayor variación estacional, siendo ultraoligotrófico en nortes, posteriormente mesotrófico en secas y oligotrófico en lluvias. En la zona B, SM y BE dieron los mismos resultados que el TSI (Chl *a*), eutróficos en nortes y secas, e hipereutróficos en lluvias. XS resultó oligotrófico y XS2 eutrófico. En la zona C todos resultaron ultraoligotróficos, excepto SHN en secas. Con respecto a la concentración de PT, al igual que en el TSI, todos los cenotes variaron entre eutrófico e hipereutrófico (Tabla 12), en la temporada de lluvias todos los cenotes resultaron hipereutróficos, excepto UCL que fue eutrófico. En la zona A UCL, MDZ y XAZ tuvieron variaciones estacionales, UCL y MDZ fueron

hipereutrófico es nortes, posteriormente eutrófico en secas y en lluvias eutrófico e hipereutrófico respectivamente. XAZ se clasificó como eutrófico en nortes, e hipereutrófico en las dos temporadas restantes. LKN no tuvo variación estacional, siendo hipereutrófico en todas las temporadas. Los cenotes de la zona B se clasificaron en el rango de los hipereutrófico, excepto SM en secas, que se clasificó como eutrófico. En la zona C, NYH y SHN se clasificaron como hipereutrófico sin variación estacional, mientras que NMZ solo durante lluvias, en nortes y secas fue eutrófico.

Tabla 12. Estado trófico de los cenotes, con base en los valores dados por la OECD para la concentración de clorofila y fósforo total para las tres temporadas analizadas.

SITIO	Chl a ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)			PT ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)		
	NORTES	SECAS	LLUVIAS	NORTES	SECAS	LLUVIAS
UCL	0.035	0.080	0.033	394.25	61.75	99.75
MDZ	0.035	0.178	0.144	361	98.17	185.25
XAZ	1.607	2.429	2.468	90.25	166.25	232.75
LKN	0.394	7.919	1.200	137.75	213.75	289.75
SM	13.878	8.309	38.910	380	57	251.75
BE	8.193	8.972	48.398	1197	907.25	3904.5
XS	2.445			247		
XS2	23.172			384.75		
NMZ	0.252	0.805	0.635	71.25	85.5	356.25
NYH	0.000	0.014	0.001	147.25	194.75	104.5
SHN	0.996	1.532	0.726	137.75	171	194.75

Los índices empleados muestran similitudes en sus resultados dependiendo de la variable empleada para la medición, sin embargo el índice de TSl_{Chl} tuvo mayor variación que los valores de clorofila de la OECD, por el contrario en los índices determinados mediante P_T , Tsl_{P_T} tuvo menor variación.

8. DISCUSIÓN

8.1. Hidrología

Para discutir los parámetros hidrológicos se tomará en cuenta el grado de apertura o exhibición de los cenotes al cielo abierto: semi-cerrados (UCL, MDZ, NMZ, SHN y NYH), que son aquellos que aún conservan parte del domo, y abiertos, en donde el lente de agua puede o no estar a nivel del suelo y el techo ha colapsado completamente (XAZ, LKN, SM, XS y XS2). Lo anterior es porque el nivel de apertura está relacionado por una parte, con el grado de radiación solar que llega al cenote, que además de incidir en la actividad fotosintética, una fracción de esta se transfiere en forma de calor y afecta la temperatura del agua, y en segunda instancia porque el esfuerzo del viento sobre el agua superficial aumenta la convección en la columna de agua, modificando o rompiendo la estratificación de los cenotes (Díaz-Arce *et al.*, 2001). Además, los cenotes abiertos reciben mayores aportes de materia orgánica de los alrededores favoreciendo el crecimiento de productores primarios, lo que al final se traduce en un incremento en el pH, la turbidez y la concentración de oxígeno (Schmitter-Soto *et al.*, 2002).

Los valores obtenidos para los parámetros hidrológicos (temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y potencial de hidrógeno) coinciden con los intervalos de valores reportados para otros cenotes en la Península de Yucatán (Alcocer *et al.*, 1998; Schmitter-Soto *et al.*, 2002; Cervantes-Martínez *et al.*, 2009; Pérez *et al.*, 2011). Los factores identificados que influyen en el comportamiento hidrológico de los cenotes son: la estacionalidad de la precipitación y temperatura atmosférica, así como las características geológicas, debido a las altas concentraciones de carbonato provenientes de la dilución de la roca caliza (Pérez *et al.*, 2011). Durante la temporada de nortes los perfiles fueron homogéneos en los primeros metros debido al flujo convectivo de la masa de agua estimulado por el efecto del viento en la superficie (Schmitter-Soto *et al.*, 2002). Los vientos fuertes y de corta duración causados por los frentes fríos, reducen la temperatura en la superficie y promueven la convección que homogeniza la masa de agua (Ruiz-Castillo *et al.*, 2016). Este proceso también incrementa también la concentración de

OD debido al efecto de mezcla el agua, que introduce oxígeno al agua. Por el contrario, en la temporada de secas y lluvias existió un aumento superficial en los perfiles de la temperatura debido al incremento en la temperatura atmosférica y la disminución de los vientos pero también se redujo el OD (Schmitter-Soto *et al.*, 2002; Cervantes-Martínez *et al.*, 2009; Torres-Talamante *et al.*, 2011).

En general, en la mayoría de los cenotes en los que se obtuvieron mediciones de perfiles hidrológicos, tuvieron perfiles homogéneos a lo largo de la columna de agua por lo que pueden clasificarse como holomícticos, de acuerdo al régimen de mezcla, ya que en estos sitios la masa de agua permanece sin estratificación o sus aguas se mezclan completamente por lo menos una vez al año (Zadereev *et al.*, 2017). Por efecto de la conectividad con el acuífero que mantiene un flujo constante, debido a ello estos cenotes pueden clasificarse como lóuticos, debido a que existe un flujo constante de agua entre el cenote y el acuífero (Schmitter-Soto *et al.*, 2002) En cambio, UCL se comporta como un cenote meromíctico debido a la existencia permanente de dos capas que no se mezclan en ninguna temporada, la más profunda, con alta conductividad eléctrica y condiciones anóxicas (Schmitter-Soto *et al.*, 2002; Torres-Talamante *et al.*, 2011), en cenote XS también presenta una ligera estratificación en el perfil medido en nortes, sin embargo no se pudo determinar si esta condición permanece debido a la falta de mediciones en las temporadas restantes.

Los cenotes abiertos presentaron mayores variaciones en la temperatura entre temporadas, aquellos con profundidades menores a 20 m mantuvieron perfiles homogéneos a lo largo de la columna de agua, mientras que SM (prof >20 m) tuvo una estratificación superficial hasta los 10 m de profundidad, lo que coincide con los patrones estacionales reportados anteriormente (Schmitter-Soto *et al.*, 2002; Cervantes-Martínez *et al.*, 2009).

La conductividad eléctrica superficial coincidió con los valores reportados de agua dulce para los cenotes de la PY, ($CE < 3.00 \text{ mScm}^{-1}$) (Schmitter-Soto *et al.*,

2002; Cervantes-Martínez *et al.*, 2009; Pérez *et al.*, 2011; Torres-Talamante *et al.*, 2011), que está controlada por la disolución de carbonato de calcio de la matriz rocosa (Perry *et al.*, 2002). En los cenotes más profundos UCL y XS, la capa profunda mostró valores similares a los del agua de mar ($CE \geq 50 \text{ mScm}^{-1}$), que concuerda con los reportes para cenotes meromícticos (Torres-Talamante *et al.*, 2011). Particularmente en el caso de UCL se tienen reportes de la posible existencia de un sistema de cavernas profundas desarrolladas en el límite del cretácico-triásico a la cual correspondería la masa de agua que se observa a partir de los 67 m de profundidad (Perry *et al.*, 2002). En el caso de XS al tener mayor cercanía a la costa, el incremento en la CE en el fondo podría deberse a la intrusión de agua de mar (Pérez-Ceballos *et al.*, 2012; Perry *et al.*, 2002).

Los cenotes de la PY suelen estar subsaturados de oxígeno ($OD \leq 50\%$) debido al bajo intercambio de gases con la atmósfera, lo cual es más pronunciado en los cenotes semicerrados. Otro caso de baja concentración de OD es el cenote San Miguel, en dónde la concentración de OD superficial en las temporadas de secas y lluvias es menor a $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, aunque en este caso está asociado a la degradación de materia orgánica proveniente del fitoplancton abundante en los cenotes de la zona B (Schmitter-Soto *et al.*, 2002). El cenote XS2 fue el único con sobresaturación de oxígeno (114.2%), un efecto dado por el incremento de los vientos de la temporada de nortes, causados por los frentes fríos que al disminuir la temperatura atmosférica favorecen la disolución de oxígeno en la columna de agua, sobre todo en sitios cercanos a la costa (Pérez-Ceballos *et al.*, 2012; Ruiz-Castillo *et al.*, 2016), otro factor que podría influir es la alta productividad primaria por efecto de la actividad fotosintética que se corrobora con la alta biomasa en este sitio (Díaz-Arce *et al.*, 2001).

En la temporada de secas el pH fue de cercano a la neutralidad a ligeramente alcalino en todos los cenotes ($pH=6.6-7.8$), valores similares a los reportados previamente para cuerpos de agua en la PY (Herrera-Silveira *et al.*, 1998; Schmitter-Soto *et al.*, 2002; Pérez *et al.*, 2011; Torres-Talamante *et al.*, 2011). En la temporada

de lluvias el pH disminuyó en todos los sitios, en el caso de UCL y BE fue menor a los valores reportados para otros sitios de la Península de Yucatán (pH=5.9). Los procesos que podrían originar este resultado son el efecto del incremento en la entrada de agua cargada con CO₂ que reacciona y se transforma en ácido carbónico (Schmitter-Soto *et al.*, 2002; Beddows *et al.*, 2007), o el aporte de ácidos orgánicos por incremento en el arrastre de materia orgánica (Thurman, 1985). Sin embargo, esto también podría deberse a una mala calibración en el sensor, ya que la variación en el pH es mayor a la reportada en otros cenotes con características similares.

8.2. Nutrientes

Las concentraciones de nutrientes en la Península de Yucatán fueron muy variables. Los NO_x fueron la forma de nutriente más abundante (Tabla 13) (Hernández-Terrones *et al.*, 2010; Pérez & Pacheco, 2004) y sus altas concentraciones están asociadas a zonas agrícolas, ganaderas y aquellas densamente pobladas, debido al uso de agroquímicos y descargas de aguas residuales domésticas (Schmitter-Soto *et al.*, 2002; Pacheco-Castro *et al.*, 2017). Contrario a lo reportado previamente en la literatura, en este estudio se obtuvieron las concentraciones más altas de N_T en las zonas A (229.7 μmol·L⁻¹) y C (200.8 μmol·L⁻¹), asociadas a la agricultura y el turismo respectivamente, esto debido a la entrada de nutrientes proveniente de áreas circundantes que llega al sistema pero no es aprovechado por los productores primarios. Por el contrario, en la zona B con actividad agrícola-ganadera, los cenotes SM, BE y XS2 tuvieron las menores concentraciones de N_T (135.8 μmol·L⁻¹). Esto podría deberse a que aunque reciben altas concentraciones de nutrientes, estos son consumidos rápidamente por los productores primarios (Schmitter-Soto *et al.*, 2002) y convertidos en nitrógeno orgánico, esto puede corroborarse con los valores obtenidos en las abundancias (>1x10⁷ cel·L⁻¹) y las altas concentraciones de clorofila *a* (>8 μg·L⁻¹), además de la presencia de cianobacterias como *Microcystis* que tienen la capacidad de asimilar diversas formas de nitrógeno ya sea como nitrato, amonio o urea (O'Neil *et al.*, 2012). Reflejo de esto, es la dominancia de la fracción orgánica en estos cenotes

($N_{Org}/N_T > 0.5$, excepto XS 0.05). O sea, que más del 50% del N del sistema está en forma de biomasa (Tabla 7).

Los cenotes de las zonas A y C, además de XS (zona B), tuvieron altas concentraciones de N_T , que en su mayoría se encuentra en forma oxidada, también presentan baja biomasa de fitoplancton lo que implica una alta limitación por fósforo ($N:P > 90$) debido a que este nutriente coprecipita con los carbonatos presente en sistemas cársticos y no queda biodisponible para el fitoplancton (Otsuki & Wetzel, 1972; Schmitter-Soto *et al.*, 2002; Hernández-Terrones *et al.*, 2010). Otro tipo de limitación que puede actuar en conjunto con la falta de fósforo es aquella dada por los bajos niveles de luz que se presentan en cenotes semicerrados. Así, la colimitación entre *PRS* y la luz podría explicar las bajas concentraciones de clorofila en estos sitios, a pesar de la alta concentración de nitrógeno oxidado (Schmitter-Soto *et al.*, 2002).

El N_T es aproximadamente semejante al NO_x en las zonas A y C lo que implica que casi todo el N sea inorgánico ($N_{Org}/N_T \leq 0.2$). En contraparte, en la zona B el N_T es menor que en las otras zonas (excepto el XS). La razón de lo anterior es que en estos sistemas el NO_x se puede estar utilizando rápidamente para generar biomasa lo cual se puede observar en las altas concentraciones de N_{Org} en esos sitios.

Tabla 13. Concentración de NO_x y *PRS* ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) encontrada en agua subterránea de la PY.

Referencia	Sitio	NO_x			<i>PRS</i>		
		Media	Min	Max	Media	Min	Máx
Este estudio	11 cenotes (Yuc.)	155.44	2.75	274.07	2.81	0.37	33.85
Alcocer <i>et al.</i> , 1998*	5 cenotes (Q. Roo)		5.06	19.76		ND	0.53
Pacheco <i>et al.</i> , 2000*	12 Pozos (Yuc.)	639.09	117.74	2508.06			
Schmitter-Soto <i>et al.</i> , 2002	30 cenotes (PY)	64.27	0.54	515	1.59	0.02	20.00
Hernández-Terrones <i>et al.</i> , 2010	10 pozos (Q. Roo)	269.37	ND	ND	0.66		

Torres-Talamantes <i>et al.</i> , 2011	Nohoch Hol (Q. Roo)	35	ND	ND	BND		
Irola-Sansores <i>et al.</i> , 2014*	Mumundzonot, Noh Mozón y Calcuch (Yuc.)	41.26	35.38	44.92	-	ND	0.0105

*Valores dados para NO₃, *ND* datos no disponibles, *BND* no detectado

Las concentraciones promedio de P_T por cenote fueron menores a 2.5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ en todos los sitios, excepto Buena Esperanza (21.08 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$), lo que coincide con los reportes anteriores para cenotes y pozos en la Península de Yucatán. Este comportamiento es esperado en las zonas cársticas dónde el fósforo coprecipita con el calcio y deja de estar disponible en forma soluble (Hernández-Terrones *et al.*, 2010; Otsuki & Wetzel, 1972). El cenote Buena Esperanza tuvo la concentración promedio más alta, que supera ligeramente a la mayor concentración reportada previamente (Schmitter-Soto *et al.*, 2002). Este incremento en la concentración de fósforo podría estar ligado al constante aporte de las excretas de ganado, que además transportan P mediante la escorrentía a través del suelo (Alloush *et al.*, 2003), este suele acumularse en el sedimento y puede ser resuspendido o liberado por diversos factores como el efecto en el incremento de los vientos, la actividad microbiana que degrada la materia orgánica en el sedimento o la oxidación de fósforo unido al hierro (Søndergaard *et al.*, 2003).

Los valores obtenidos de la relación N:P en su mayoría rebasaron los encontrados por Hernández-Terrones *et al.* (2010) en pozos, lo que confirma la limitación por fósforo que existe en la mayoría de los cenotes, excepto el cenote Buena Esperanza (N:P=5.30), en dónde la relación N:P fue menor a la relación de Redfield, o sea, que el sistema se encuentra limitado por nitrógeno.

8.3. Fitoplancton

Las densidades y la biomasa de fitoplancton fueron muy variables entre los cenotes de la Península de Yucatán. Para poder explicar las tendencias de los

cenotes, éstos se agruparon de acuerdo a la densidad en $\text{cel}\cdot\text{L}^{-1}$: cenotes con baja densidad ($\leq 10^3 \text{ cel}\cdot\text{L}^{-1}$) como UCL, MDZ, NMZ, NYH, SHN y LKN en la temporada de nortes; los cenotes con densidad intermedia (10^4 - $10^6 \text{ cel}\cdot\text{L}^{-1}$), en este caso XAZ en nortes y secas y LKN en secas, y finalmente los cenotes con altas densidades ($\geq 10^7 \text{ cel}\cdot\text{L}^{-1}$), SM, BE, XS, XS2 y el cenote XAZ en la temporada de lluvias. En general, los rangos de concentración de clorofila coinciden con las abundancias celulares aunque hay conteos altos asociadas a bajas concentraciones de clorofila debido a la presencia de células muy pequeñas. Por lo anterior, aunque la estimación de la abundancia y la cuantificación de la clorofila a son parámetros que evalúan la cantidad de fitoplancton, no necesariamente está correlacionados debido a la dificultad para la identificación y conteo de células de menor tamaño.

De acuerdo con los resultados de otros estudios realizados en la Península de Yucatán, las abundancias más altas de fitoplancton se presentan durante las temporadas de secas y lluvias, asociadas al incremento de temperatura que se da durante esos meses (López-Adrián & Herrera-Silveira, 1994; Díaz-Arce *et al.*, 2001). Este patrón se pudo observar en los cenotes de las zonas B y C, y en LKN y XAZ de la zona A, ya que en el caso de UCL y MDZ las abundancias más altas se presentaron en nortes. Sin embargo, en el caso de la concentración de clorofila, ésta fue mayor en la temporada de secas en las zonas A y C, y en la de lluvias en los cenotes de la zona B, además de XAZ de la zona A.

Los cenotes con baja abundancia tuvieron concentraciones de Chl *a* menores a $1.5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, excepto SHN en la temporada de secas que fue ligeramente mayor ($1.53 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), estos cenotes estuvieron dominados por diatomeas pennadas y en menor proporción por clorofitas. Los cenotes con abundancia intermedia tienen concentraciones de Chl *a* que van de 1.2 a $2.5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (XAZ nortes y secas, LKN lluvias). Por la concentración de Chl *a*, la temporada de lluvias en XAZ podría considerarse dentro de este grupo, pero en la abundancia rebasa el rango previamente estipulado. En general, estos cenotes fueron los más variables en cuanto al número y proporción de grupos de fitoplancton presentes, ambos sitios

tuvieron presencia de los cuatro grupos de fitoplancton identificados (Tabla 8), además en ellos se encontraron colonias de cianobacterias. Ambos cenotes son abiertos, aunque XAZ recibe mayor radiación ya que la cobertura vegetal en el área circundante es menor. LKN registró la menor temperatura superficial durante nortes, lo que podría explicar la disminución de la abundancia en esta temporada aunque durante la temporada de secas tuvo un incremento en la abundancia de hasta $2.33 \times 10^8 \text{ cel} \cdot \text{L}^{-1}$ debido a un *bloom* dominado por criptofitas, que se confirmó con el incremento en las concentraciones aloxantina, estas representaron una contribución del 66% de la clorofila según los datos obtenidos con CHEMTAX. Se desconoce la especie que propició este *bloom* así como las condiciones ambientales que lo favorecieron. Posteriormente, en la temporada de lluvias la abundancia total disminuyó a $5.13 \times 10^4 \text{ cel} \cdot \text{L}^{-1}$ y la contribución de las criptofitas descendió al 53%. Estos dos cenotes estuvieron dominados por diatomeas, clorofitas y cianobacterias (Tabla 8), con valores similares a los reportados por López-Adrián & Herrera-Silveira (1994) en el cenote Xtogil, que también estuvo dominado por estos grupos y en el que se encontró una tendencia a la eutrofización.

Los cenotes de la zona B tuvieron los valores más altos de abundancia de fitoplancton, estuvieron dominados por colonias de cianobacterias y en menor medida de clorofitas, situación señalada previamente por Díaz-Arce *et al.* (2001) en dos cenotes abiertos con abundancias similares (

Tabla 1).

Según Díaz-Arce *et al.*, 2001 y Schmitter-Soto *et al.*, 2002 los factores que influyen en el fuerte incremento de la abundancia tienen que ver con la forma de los cenotes, ya que los cenotes abiertos reciben mayor radiación solar y aporte de materia orgánica, que después de ser degradada se transforma en nutrientes inorgánicos disponibles para su asimilación. Los cenotes de la zona B cumplen con estas características. Además, encuentran localizados dentro de una de las zonas de contaminación identificadas por Pacheco *et al.* (2017) correspondiente a la zona ganadera del estado, caracterizada por altas concentraciones de nitratos que favorece la producción de biomasa. Estos cenotes presentaron valores de abundancia de 4.81×10^8 hasta 9.62×10^9 cel·L⁻¹, lo cual evidentemente se refleja en las mayores concentraciones de Chl *a* observadas en la temporada de lluvias, favorecida también por el incremento de la temperatura durante esta temporada (López-Adrián & Herrera-Silveira, 1994; Díaz-Arce *et al.*, 2001) y el arrastre de materia orgánica por efecto del incremento en las lluvias (Schmitter-Soto *et al.*, 2002).

De acuerdo a los resultados obtenidos mediante las relaciones pigmentarias y las estimaciones de abundancia, los grupos de fitoplancton dominantes fueron las cianobacterias coccas formadoras de colonias, en particular los géneros *Mycrocystis* y *Aphanocapsa*. De hecho en los cenotes XS, XS2 y SM la dominancia de este grupo fue consistente. En el cenote XS el Orden de las *Chroococcales* y el género *Pseudoanabaena* estuvieron ampliamente representados. En el cenote SM se observó una transición de la dominancia de bacterias coloniales en nortes y secas a la dominancia de cianobacterias filamentosas asociada a un incremento de más de cuatro veces la clorofila respecto a la temporada previa. Por su parte, en el cenote del rancho BE las clorofitas fueron el grupo dominante en los conteos durante nortes y lluvias, mientras que de acuerdo a los resultados de CHEMTAX las cianobacterias fueron el grupo dominante en las tres temporadas principalmente del género *Merismopedia*. Esta discrepancia en la dominancia de los grupos estimados

por estos dos métodos se puede deber a que la abundancia (conteos) no refleja bien la biomasa (clorofila) debido a que las cianobacterias son de menor tamaño lo que dificultó su conteo e identificación en el microscopio, lo que pudo generar una subestimación de la abundancia real. Por lo tanto ambos métodos pueden funcionar como complementarios en la identificación de grupos de fitoplancton.

En estos cenotes de la zona B, se observó una menor limitación por fósforo comparada con el resto de los cenotes ($N:P \leq 46$), y en el caso de BE el sistema se encontró limitado por nitrógeno ($N:P = 5.30$), lo que podría deberse a un exceso en la entrada de fósforo por el arrastre de heces de ganado, ya que este cenote se encuentra a un costado de un corral ganadero, lo que coincide con las concentraciones de P encontradas por Herrera-Silveira *et al.* (1998) en un pequeño cenote fertilizado por vacas. Por el contrario, en XS, se encontró una relación N:P ($N:P = 96.81$) similar a la de los cenotes con bajas abundancias, esto coincide con la concentración de Chl *a* ($2.45 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), que es similar a los cenotes con abundancias intermedias. No obstante, hay que recordar que de este sitio sólo se tienen datos para la temporada de menor abundancia de fitoplancton (nortes). Además, el cenote una entrada de agua constante como se observa en los perfiles (Figura 7), lo que mantiene la limitación por fósforo a pesar del aporte de nutrientes que pudiera recibir por fuentes antropogénicas.

Para evaluar el aprovechamiento del nitrógeno por parte del fitoplancton se analizó la relación $N_{\text{Org}}/N_{\text{T}}$ y se comparó con la concentración de Chl *a* de cada cenote, se encontró una correlación positiva ($R = 0.92$, Figura 19), lo que indica que una fracción importante del nitrógeno orgánico se encuentra en forma de biomasa de fitoplancton. De esta forma se pueden categorizar dos grupos principales, el primero con baja Chl *a* y baja proporción de N_{Org} , en el que se encuentran UCL, MDZ, XAZ, LKN, XS, NMZ, SHN y NYH, que se encuentran limitados por fósforo, por luz, o colimitados por ambos factores, lo que impide la producción de biomasa a pesar de tener altas concentraciones de nitrógeno, y los que tienen una alta

concentración de Chl *a* y alta proporción de N_{Org} en el que se encuentran BE, SM y XS2, que además son cenotes abiertos.

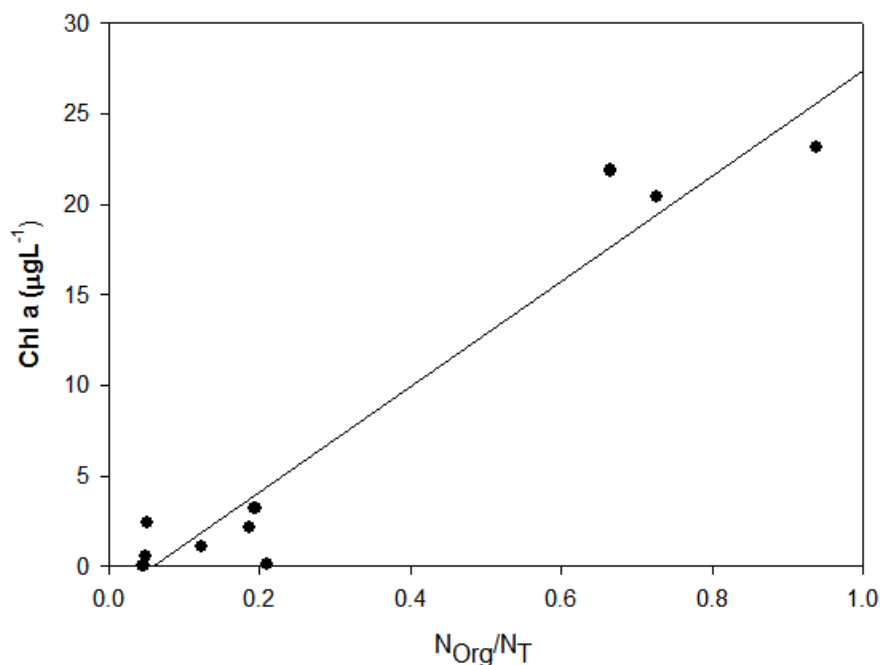


Figura 19. Regresión lineal de la clorofila vs N_{Org}/N_T

8.4. Índices tróficos

Los resultados de los índices de Chl *a* y P_T son contrastantes, por un lado los resultados estimados mediante Chl *a* dan mayor variación entre zonas y entre temporadas, con algunas similitudes entre el TSI_{Chl} y los valores de la OECD, que van desde cenotes ultraoligotróficos hasta cenotes hipereutróficos. Por otro lado, en los índices para P_T los cenotes variaron de eutróficos a hipereutróficos. A pesar de que ambos índices dan resultados similares, el TSI ofrece la posibilidad de ajustar el rango de valores dado para cada estado trófico, brindando mejores aproximaciones sobre las condiciones actuales de los cenotes, mientras que los valores dados por la OECD fueron estimados para lagos cuyas características difieren de las condiciones que regulan los cenotes.

El índice de P_T , en ambos casos, dio como resultado condiciones eutróficas para todos los sitios, si bien no se ajusta a las condiciones actuales en todos los sitios, puede significar que el sistema recibe una alta carga nutrimental capaz de generar el incremento en las poblaciones de fitoplancton, pero que se mantienen limitadas por otros factores como el flujo de agua con el área circundante o la cantidad de luz que llega a la lente de agua. Por otra parte, este tipo de índice se basa en la disponibilidad de P bioasimilable, lo que no significa que vaya a ser utilizado, debido a que son muchos los factores bióticos y abióticos que llevan a que este P sea aprovechado por productores primarios.

En el trabajo realizado por Schmitter-Soto *et al.* (2002) se estimó el estado trófico de 30 cenotes con base en la concentración de Chl *a*, aunque no se muestran detalles por cenote, se puede observar la variación del estado trófico de algunos sitios de acuerdo a las estaciones climáticas, en dónde el mayor número de sitios con estado oligotrófico en la temporada de nortes, esto coincide con los resultados encontrados el presente trabajo (Tabla 11 y Tabla 12).

Los índices calculados mediante Chl *a* parecen ser una medida representativa para describir las condiciones actuales de los cenotes. Para ello, se agruparon los cenotes con base en su estado trófico. Los cenotes ultraoligotróficos resultaron ser UCL y MDZ de la zona A y NYH de la zona C, que permanecen sin variaciones temporales, estos cenotes tienen concentraciones de Chl *a* menores a $0.2 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, que coinciden con otros reportes de cenotes oligotróficos en la Península de Yucatán (Cervantes-Martínez *et al.*, 2017), además UCL y MDZ conservan esta condición previamente reportada por Hernández-Terrones *et al.* (2011). Seguidos de estos en escala trófica se encuentran NMZ y SHN (zona C), que según los valores de la OECD son ultraoligotróficos, excepto SHN en secas clasificado como oligotrófico, mientras que para el TSI_{Chl} ambos son oligotróficos y NMZ resultó ultraoligotrófico en nortes, estos cenotes tuvieron concentraciones de Chl *a* entre $0.2\text{-}1.5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, en el caso de NMZ sigue presentando el mismo patrón de

concentración de Chl *a* reportado por Hernández-Terrones *et al.* (2011), con un ligero incremento en las concentraciones.

Los cenotes con estado oligo-mesotróficos fueron XAZ, LKN (zona A) y XS (zona B). En el caso de XAZ los valores de la OECD lo clasifican como oligotrófico sin cambios estacionales, por el contrario, el TSI_{Chl} resultó en un estado mesotrófico para las temporadas de secas y lluvias, mientras que LKN pasó de ultraoligotrófico (nortes) a mesotrófico (secas) según los valores de la OECD y en el TSI_{Chl} la variación es de oligotrófico a eutrófico en las mismas temporadas, esto se debe al *Bloom* de criptofitas previamente descrito (Tabla 8), en la temporada de secas ambos índices coinciden en que el cenote regresa a la oligotrofia. Del cenote XS no se tiene temporalidad, sin embargo, los valores de la OECD lo clasifican como eutrófico y el TSI_{Chl} como mesotrófico, esto puede deberse a que el cenote tiene un flujo considerable de agua proveniente de algún conducto de mayor tamaño, lo que le permite amortiguar la entrada de nutrientes que recibe al estar dentro de la zona ganadera y tener condiciones morfológicas similares a las de los cenotes eutrofizados. Las concentraciones de Chl *a* y las abundancias de fitoplancton de estos cenotes son similares a los encontrados por Díaz-Arce *et al.* (2001) en los cenotes Xlaká e Ixinha que además comparten la característica de ser cenotes abiertos en los que la lente de agua no se encuentra a ras de suelo.

Finalmente, los cenotes SM, BE y XS2 ubicados en la zona B, variaron de eutróficos a hipereutróficos, en el caso de SM y BE ambos índices muestran los mismos resultados, con estados eutróficos en las temporadas de nortes y secas, y un estado hipereutrófico en lluvias. En el caso de XS2 los valores de la OECD lo clasifican como eutrófico y el TSI_{Chl} como hipereutrófico. Estos cenotes tuvieron las concentraciones de Chl más altas ($>8 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), además se encuentran dentro de la región ganadera asociada a alta contaminación por NO₃ (Pacheco *et al.*, 2017), son abiertos con el nivel del agua a ras de suelo y dominados por cianobacterias.

8.5. Discusión general

El recurso hídrico disponible en el norte de la Península de Yucatán proviene del agua almacenada en acuífero, por lo que resulta fundamental conocer el funcionamiento del sistema desde aspectos físicos, químicos, geológicos e incluso biológicos, que ayuden a preservar y mejorar las condiciones de este recurso (Hernández-Terrones *et al.*, 2011; Marin *et al.*, 2000; Pacheco *et al.*, 2017). Diversos estudios han demostrado que la variabilidad climática, las características de la matriz rocosa y las actividades humanas determinan las condiciones de la calidad del agua (Hernández-Terrones *et al.*, 2015; Pacheco *et al.*, 2017; Pérez *et al.*, 2011). De lo anterior depende el estado trófico de los cenotes como un reflejo de las condiciones actuales y potenciales a las cuales puede llegar el acuífero, estos van desde ultraoligotróficos hasta hipereutróficos. El primer caso sería el estado ideal, en el que la calidad del agua es suficientemente buena para mantener el abastecimiento para consumo a largo plazo, mientras que en el otro extremo se tiene un sistema en el que el agua está contaminada con materia orgánica y puede generar los efectos nocivos de la eutrofización como la hipoxia o la sustitución de especies fitoplanctónicas, la cuales pueden producir toxinas cuyo impacto en la salud humana puede ser nocivo.

Las principales actividades humanas ligadas al deterioro de la calidad del agua son la agricultura y la ganadería debido al exceso de nutrientes que llegan al agua producto de estas mismas (Hernández-Terrones *et al.*, 2015; Pacheco & Cabrera, 2003; Pacheco *et al.*, 2017; Pérez *et al.*, 2011), que, al mismo tiempo, son dos de las actividades más importantes en las que se basa el desarrollo económico de Yucatán (INEGI, 2017). Este incremento en la carga de nutrientes, principalmente N y P, favorece el crecimiento de productores primarios (Bellinger & Sigee, 2010; Glibert *et al.*, 2018), que en un principio se pueden observar con *blooms* temporales, como el caso de LKN, o el de Xtogil reportado por López-Adrián & Herrera-Silveira (1994) asociado al incremento en la temperatura, lo que nos indica la presencia de factores pueden llevar a la eutrofización del sistema, o como el caso de cenotes como SM, BE y XS2, ligados a actividades ganaderas, en dónde

el sistema está dominado por cianobacterias potencialmente tóxicas, ej. *Microcystis* y *Anabaena*, favorecidas por el incremento de nutrientes y temperatura (Reynolds, 2006; Istvánovics, 2009; O'Neil *et al.*, 2012). Esta información puede ayudar a prevenir futuros problemas en cenotes oligotróficos como NYH, MDZ o UCL.

En el pasado reciente se instituyó la primera reserva geohidrológica en Yucatán (DOF, 2013) como una forma para mantener la calidad del agua del acuífero y al mismo tiempo como una herramienta de estudio que permita generar investigación y conocimiento de este recurso para su preservación a largo plazo. Una de las directrices más importantes es la de mantener el uso de suelo con actividades de bajo impacto y no permitir la ganadería extensiva. Ante los resultados obtenidos por este trabajo, es importante plantear la conformación de una segunda reserva de este tipo en la zona A, en la cual aún hay cenotes oligotróficos pero también otros cenotes en los que se comienzan a percibir condiciones adversas (LKN y XAZ).

Actualmente, a nivel global, se buscan medidas para prevenir e incluso revertir potenciales problemas de eutrofización en lagos de todo el mundo, eliminando las altas concentraciones de fósforo y nitrógeno en aguas residuales, limitando el uso de fertilizantes y/o instituyendo sistemas eficientes de tratamiento de agua (Istvánovics, 2009; Verbeek *et al.*, 2018). Estas y otras soluciones son impostergables en el contexto de las transformaciones y modificaciones que sufre la Península de Yucatán debido a la extensión de la frontera agrícola y a las necesidades de alimentos de una creciente población humana en la zona. El no tomar medidas urgentes pone en riesgo uno de los acuíferos de México que, por su dimensión e importancia, su conservación debe ser considerada prioridad.

9. CONCLUSIONES

- Los cenotes presentaron una marcada variación estacional de la temperatura con los valores más bajos detectados en la temporada de nortes, posteriormente, en la temporada de secas hubo un incremento y finalmente, la temperatura más alta se registró en la temporada de lluvias. La CE de los cenotes también presentó variación con respecto a las temporadas climáticas excepto en el cenote Lukunchán.
- Respecto al OD, se observaron diferencias estacionales cuya variación mostró una relación inversa con la temperatura, siendo mayor la concentración de OD en la temporada de nortes y la menor en temporada de lluvias con excepción nuevamente de Lukunchán donde no se observaron diferencias.
- El pH que solamente se determinó en secas y lluvias, no presentó diferencias significativas entre estas temporadas en ningún cenote.
- No se encontraron diferencias significativas de la concentración de nutrientes entre temporadas en los cenotes dentro de cada zona de muestreo pero si hubo diferencias entre zonas en todos los parámetros con excepción del fósforo orgánico. Las concentraciones de N_T más altas se encontraron en las zonas A y C, además del cenote XS (zona B) y al mismo tiempo estas dos zonas presentaron las concentraciones más bajas de P_T pero la zona B tuvo las mayores variaciones en las concentraciones de N_T y P_T .
- Las concentraciones de NO_x fueron mayores en los cenotes de las zonas A y C, mientras que los cenotes de la zona B tuvieron las concentraciones más altas de N_{Org} , excepto por XS en donde NO_x fue la forma dominante de nitrógeno.
- Para todas las formas de fósforo analizadas, las variaciones fueron mínimas en las tres zonas, excepto en el cenote BE de la zona B que presentó la mayor

concentración y también la mayor variabilidad en la concentración de P_T ($21.08 \pm 17.40 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$), PRS ($16.35 \pm 15.26 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) y P_{Org} ($4.73 \pm 2.19 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$).

- La concentración de clorofila no se correlacionó con las concentraciones de NO_x ni PRS nutrientes pero se encontró una asociación con la relación N_{org}/N_T , lo que indica que la mayor parte del N_{org} se encuentra en forma de biomasa.
- Los grupos de fitoplancton dominantes en los cenotes fueron diatomeas, clorofitas, cianofitas y criptofitas. Las variaciones estacionales no fueron significativas, sin embargo en los sitios con mayores abundancias se observó un incremento durante la temporada de secas. Las diatomeas dominaron los cenotes oligotróficos, mientras que las cianobacterias dominaron los más eutrofizados.
- Las estimaciones de estado trófico determinadas mediante clorofila dieron como resultado variaciones espacio-temporales, en dónde los cenotes oligotróficos se encuentran limitados por fósforo y luz, con bajas abundancias de fitoplancton y dominados por diatomeas pennadas. Los cenotes eutrofizados están asociados a la zona ganadera, con alta biomasa y abundancia de fitoplancton, con menor limitación de por P y con mayor concentración de N_{Org} .
- Con el índice calculado con base en la concentración total de P, los cenotes variaron de eutrófico a hipereutrófico, y por los resultados de este trabajo no se aproxima a las condiciones actuales de los distintos cenotes, sin embargo podría ser una aproximación a escenarios futuros debido a la alta concentración de nutrientes que llega al sistema pero que aún no son asimilados.

10. REFERENCIAS

- Alcocer, J., Lugo, A., Marín, L. E., & Escobar, E. (1998) Hydrochemistry of waters from five cenotes and evaluation of their suitability for drinking-water supplies, northeastern Yucatan, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 6(2), pp. 293–301.
- Alley, W. (2011) Ground Water. In *U.S. Geological Survey*. San Diego, CA, USA.
- Alloush, G. A., Boyer, D. G., Belesky, D. P., & Halvorson, J. J. (2003) Phosphorus mobility in a karst landscape under pasture grazing system. *Agronomie*, 23, pp. 593–600.
- Almazán-Becerril, A., & García-Mendoza, E. (2008) Maximum efficiency of charge separation of photosystem II of the phytoplankton community in the Eastern Tropical North Pacific off Mexico : A nutrient stress diagnostic tool ? *Ciencias Marinas*, 34(1), pp. 29–43.
- Arandacirerol, N., Comín, F., & Herrera-Silveira, J. (2011) Nitrogen and phosphorus budgets for the Yucatán littoral: An approach for groundwater management. *Environmental Monitoring and Assessment*, 172(1–4), pp. 493–505.
- Bauer-Gottwein, P., Gondwe, B. R. N., Charvet, G., Marín, L. E., Rebolledo-Vieyra, M., & Merediz-Alonso, G. (2011) Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 19(3), pp. 507–524.
- Beaulieu, J. J., DelSontro, T., & Downing, J. A. (2019) Eutrophication will increase methane emissions from lakes and impoundments during the 21st century. *Nature Communications*, 10(1), pp. 3–7.
- Beddows, P., Blanchon, P., Escobar, E., & Torres-Talamante, O. (2007) Los cenotes de la península de Yucatán. *Arqueología Mexicana*, 14(83), pp. 32–35.
- Beiras, R. (2018) Nonpersistent Inorganic Pollution. *Marine Pollution*, pp. 31–39.

- Bellinger, E. G., & Sigeo, D. C. (2010) *Freshwater Algae: Identification and Use as Bioindicators* (1st edition). Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- Carlson, R. E. (1977) A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 22(2), pp. 361–369.
- Cervantes-Martínez, A., Elías-Gutiérrez, M., & Suárez-Morales, E. (2002) Limnological and morphometrical data of eight karstic systems “cenotes” of the Yucatan Peninsula, Mexico, during the dry season (February-May, 2001). *Hydrobiologia*, 482, pp. 167–177.
- Cervantes-Martínez, A., Gutiérrez-Aguirre, M. A., Elías-Gutiérrez, M., Arce-Ibarra, A. M., & García-Morales, A. (2017) Aquatic biodiversity in cenotes from the Yucatan Biodiversidad acuática en cenotes de la Península de Yucatán (Quintana Roo , México). *Teoría y Praxis*, (25), pp. 49–68.
- Cervantes-Martínez, A., Mezeta-Barrera, M., & Gutiérrez-Aguirre, M. A. (2009) Limnología básica del lago cárstico turístico Cenote Azul en Quintana Roo , México. *Hidrobiológica*, 19(2), pp. 177–180.
- Chapra, S. C., & Dobson, H. F. (1981) Quantification of the Lake Trophic Typologies of Naumann (Surface Quality) and Thienemann (Oxygen) with Special Reference to the Great Lakes. *Journal of Great Lakes Research*, 7(2), pp. 182–193.
- Díaz-Arce, V., Herrera-Silveira, J. A., & Comín, F. A. (2001) Limnological characteristics of two types of cenotes of Yucatán. *Internationale Vereinigung Für Theoretische Und Angewandte Limnologie: Verhandlungen*, 27(6), pp. 3579–3582.

- Diario Oficial de la Federación. *Decreto No. 117. Decreto que establece el Área Natural Protegida denominada Reserva Estatal Geohidrológica del Anillo de Cenotes.*, (2013).
- Esquivel, M. D. (1991) Flora béntica. In T. Camarena-Luhrs & S. I. Salazar-Vallejo (Eds.), *Estudios Ecológicos Preliminares de la Zona Sur de Quintana Roo*, pp. 85–91. Chetumal: CIQRO.
- García, E. (2004) *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. México: Instituto de Geografía, UNAM.
- Glibert, P. M. (2016) Margalef revisited: A new phytoplankton mandala incorporating twelve dimensions, including nutritional physiology. *Harmful Algae*, 55, pp. 25–30.
- Glibert, P. M., Allen, J. I., Bouwman, A. F., Brown, C. W., Flynn, K. J., Lewitus, A. J., & Madden, C. J. (2010) Modeling of HABs and eutrophication: Status, advances, challenges. *Journal of Marine Systems*, 83(3–4), pp. 262–275.
- Glibert, P. M., Berdalet, E., Burford, M. A., Pitcher, G. C., & Zhou, M. (2018) *Global Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms* (1st ed., Vol. 232; P. M. Glibert, E. Berdalet, M. A. Burford, G. C. Pitcher, & M. Zhou, Eds.).
- Hall, F. G. (1936) *Physical and chemical survey of cenotes of Yucatan*. Carnegie Institution of Washington.
- Hernández-Terrones, L. M., Null, K. A., Ortega-Camacho, D., & Paytan, A. (2015) Water quality assessment in the Mexican Caribbean: Impacts on the coastal ecosystem. *Continental Shelf Research*, 102, pp. 62–72.
- Hernández-Terrones, L. M., Rebolledo-Vieyra, M., Almazán-Becerril, A., & Valadez,

- F. (2011) *Propuesta de creación de una reserva hidrológica para el norte de Yucatán*. Yucatán, México.
- Hernández-Terrones, L., Rebolledo-Vieyra, M., Merino-Ibarra, M., Soto, M., Le-Cossec, A., & Monroy-Ríos, E. (2010) Groundwater pollution in a karstic region (NE Yucatan): Baseline nutrient content and flux to coastal ecosystems. *Water, Air, and Soil Pollution*, 218(1–4), pp. 517–528.
- Herrera-Silveira, J. A. (1999) *Patrones de variación espacial y temporal de la biodiversidad fitoplanctónica de los cenotes abiertos de Yucatán*.
- Herrera-Silveira, J. A., Comín, F. A., López, S., & Sánchez, I. (1998) Limnological characterization of aquatic ecosystems in Yucatán Peninsula (SE México). *Internationale Vereinigung Für Theoretische Und Angewandte Limnologie: Verhandlungen*, 26(3), pp. 1348–1351.
- Higgins, H. W., Wright, S. W., & Schlüter, L. (2011) Quantitative interpretation of chemotaxonomic pigment data. In S. Roy, C. A. Llewellyn, E. S. Egeland, & G. Johnsen (Eds.), *Phytoplankton Pigments: Characterization, Chemotaxonomy and Applications in Oceanography*, pp. 257–313.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI. (2017) *Anuario estadístico y geográfico de Yucatán 2017*.
- Informe de Greenpeace. (2016) *Contaminación de cenotes con plaguicidas en la Península de Yucatán*.
- Istvánovics, V. (2009) Eutrophication of Lakes and Reservoirs. In *Encyclopedia of Inland Waters*, vol. 1, pp. 157–165.
- Kratzer, C. R., & Brezonik, P. L. (1981) A Carlson-type Trophic State Index for

- Nitrogen in Florida lakes. *Water Resources Bulletin*, 17(4), pp. 713–715.
- López-Adrián, S., & Herrera-Silveira, J. A. (1994) Plankton composition in a cenote, Yucatán, México. *Internationale Vereinigung Für Theoretische Und Angewandte Limnologie: Verhandlungen*, 25(3), pp. 1402–1405.
- Lopez-Adrián, S. J., & Barrientos-Medina, R. C. (2005) Diversidad y distribución del fitoplancton de agua dulce en la Península de Yucatan, Mexico. *Ibugana*, 13(2), pp. 3–12.
- López-Adrián, S., Sánchez, I., Tavera, R., Komárek, J., Komarkova, J., & Villasuso, M. (1993) *Estudio ecológico de los cuerpos de agua continentales de la Península de Yucatán. Aspectos ficológicos. Programa de Ecología Terrestre*. Mérida.
- Mackey, M. D., Mackey, D. J., Higgins, H. W., & Wright, S. W. (1996) CHEMTAX - A program for estimating class abundances from chemical markers: Application to HPLC measurements of phytoplankton. *Marine Ecology Progress Series*, 144, pp. 265–283.
- Mackey, M. D., Mackey, D. J., Higgins, H. W., & Wrigth, S. W. (1994) CHEMTAX. A program for estimating class abundances from chemical markers: application to HPLC measurements of phytoplankton pigments. *Marine Ecology Progress Series*, 144, pp. 265–283.
- Margalef, R. (1982) *Ecología* (Omega, Ed.). Barcelona.
- Marín, L. E., & Perry, E. C. (1994) The hydrogeology and contamination potential of northwestern Yucatan, Mexico. *Geofísica Internacional*, 33(4), pp. 619–623.
- Marin, L. E., Steinich, B., Pacheco, J., & Eseolero, O. A. (2000) Hydrogeology of a

- contaminated sole-source karst aquifer, Merida, Yucatan, Mexico. *Geofísica International*, 39(4), pp. 359–365.
- Mee, L. D. (1988). A definition of critical eutrophication in marine environment. *Revista Biología Tropical*, 36(1), pp. 159–161.
- Muralikrishna, I. V., Manickam, V., Muralikrishna, I. V., & Manickam, V. (2017) Principles and Design of Water Treatment. *Environmental Management*.
- Nixon, S. W. (1995). Coastal Marine Eutrophication: A Definition, Social Causes, and Future Concerns. *Ophelia*, 41, pp. 199–219.
- O'Neil, J. M., Davis, T. W., Burford, M. A., & Gobler, C. J. (2012) The rise of harmful cyanobacteria blooms: The potential roles of eutrophication and climate change. *Harmful Algae*, 14, pp. 313–334.
- OECD. (1982) *Eutrophication of waters: monitoring, assessment and control*. Paris, Francia.
- Otsuki, A., & Wetzel, R. (1972) Coprecipitation of Phosphate with carbonates in a Marl Lake. *Limnology and Oceanography*, 17(5), pp. 763–767.
- Pacheco, J. A., & Cabrera, A. (1997) Groundwater contamination by nitrates in the Yucatan Peninsula, Mexico. *Hydrogeology Journal*, Vol. 5, pp. 47–53.
- Pacheco, J., & Cabrera, A. (2003) Fuentes principales de nitrógeno de nitratos en aguas subterráneas. *Ingeniería*, 7(2), pp.47–54.
- Pacheco, J., Marin, L., Cabrera, A., Steinich, B., & Escolero, O. A. (2000) Nitrate temporal and spatial patterns in 12 water-supply wells, Yucatan, Mexico. *Environmental Geology*, 40(6), pp. 708–715.

- Pacheco, R., Pacheco, J., Ye, M., & Cabrera, A. (2017) Groundwater Quality: Analysis of Its Temporal and Spatial Variability in a Karst Aquifer. *Groundwater*, 56(1), pp. 62–72.
- Pajeres, S. (2016) La cascada del nitrógeno ocasionada por actividades humanas.
- Pepper, I., Gerba, C., & Gentry, T. (2007) *Environmental Microbiology, Third Edition*. USA: Elsevier.
- Pérez-Ceballos, R., Pacheco-Ávila, J., Euán-Ávila, J. I., & Hernández-Arana, H. (2012) Regionalization based on water chemistry and physicochemical traits in the ring of Cenotes, Yucatan, Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies*, 74(1), pp. 90–102.
- Pérez, L., Bugja, R., Lorenschat, J., Brenner, M., Curtis, J., Hoelzmann, P., Islebe, G., Scharf, B., & Schwalb, A. (2011) Aquatic ecosystems of the Yucatán Peninsula (Mexico), Belize, and Guatemala. *Hydrobiologia*, 661(1), pp. 407–433.
- Pérez, R., & Pacheco, J. (2004) Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación de nitratos en el estado de Yucatán. *Ingeniería*, 8(1), pp. 33–42.
- Perry, E., Velazquez-Oliman, G., & Marin, L. E. (2002) The hydrogeochemistry of the karst aquifer system of the northern Yucatan Peninsula, Mexico. *International Geology Review*, 44(3), pp. 191–221.
- Reguera, B., Alonso, R., Moreira, A., & Méndez, S. (2011) Guía para el diseño y puesta en marcha de un plan de seguimiento de microalgas productoras de toxinas. *COI de UNESCO y OIEA*. Paris y Viena.

Reynolds, C. (2006) *Ecology of Phytoplankton* (Vol. 6). Cambridge University Press.

Reynolds, C. S. (2006) Phytoplankton ecology and aquatic ecosystems: mechanisms and management. In *Ecology of Phytoplankton*. Vol. 91, pp. 387–436. Cambridge: Cambridge University Press.

Richardson, K., & Jorgensen, B. (1996) Eutrophication: Definition, History and Effects. In *Eutrophication in Coastal Marine Ecosystems*. Vol. 52, pp. 1–19. American Geophysical Union.

Ruiz-Castillo, E., Gomez-Valdes, J., Sheinbaum, J., & Rioja-Nieto, R. (2016) Wind-driven coastal upwelling and westward circulation in the Yucatan shelf. *Continental Shelf Research*, 118, pp. 63–76.

Ruiz-Silva, J., Rivadeneyra, J., Pacheco, A., Sosa-Escalante, J., & Morales-Arjona, L. J. (2007) *Caracterización de los Cenotes y Grutas del Estado de Yucatán, México*.

Sánchez-Molina, J. (1985) Bacillariophyta. *Flora Planctónica de los Cenotes de Yucatán*, pp. 1–9. Mérida: UADY.

Sánchez, M., Alcocer, J., Escobar, E., & Lugo, A. (2002) Phytoplankton of cenotes and anchialine caves along a distance gradient from the northeastern coast of Quintana Roo, Yucatan Peninsula. *Hydrobiologia*, 467, pp. 79–89.

Schmitter-Soto, J., Comín, F., Escobar-Briones, E., Herrera-Silveira, J., Alcocer, J., Suárez-Morales, E., Elías-Gutiérrez, M., Díaz-Arce, V., Marín, L. E., & Steinich, B. (2002) Hydrogeochemical and biological characteristics of cenotes in the Yucatan Peninsula (SE Mexico). *Hydrobiologia*, 467, pp. 215–228.

Schmitter-Soto, J., Escobar-Briones, E. G., Alcocer, J., Suárez-Morales, E., Elías-

- Gutiérrez, M., & Marín, L. E. (2002) Los cenotes de la Península de Yucatán. *Lagos y Presas de México* (pp. 337–381). México, D.F.
- Smith, V. H., Tilman, G. D., & Nekola, J. C. (1998) Eutrophication: Impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*, 100(1–3), pp. 179–196.
- Smith, Val H., & Schindler, D. W. (2009) Eutrophication science: where do we go from here? *Trends in Ecology and Evolution*, 24(4), pp. 201–207.
- Søndergaard, M., Jensen, J., & Jeppesen, E. (2003) Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes. *Hidrobiología*, pp. 135–145.
- Sosa-Escalante, J., & Chablé-Santos, J. (2013). Conservación y manejo de los cenotes. *Ordenamiento Territorial del Estado de Yucatán: Visión 2030*, pp. 63–74. México: Universidad Autónoma de Yucatán. Gobierno del Estado de Yucatán.
- Sutton, M. A., Bleeker, A., Howard, C. M., Bekunda, M., Grizzetti, B., de Vries, W., ... Zhang, F. S. (2013) *Our Nutrient World: The challenge to produce more food and energy with less pollution*.
- Thurman, E. M. (1985) *Organic Geochemistry of Natural Waters* (M. Nijhoff & W. Junk, Eds.).
- Torres-Talamante, O., Alcocer, J., Beddows, P. A., Escobar-Briones, E. G., & Lugo, A. (2011) The key role of the chemolimnion in meromictic cenotes of the Yucatan Peninsula, Mexico. *Hydrobiologia*, 677(1), pp. 107–127.
- Valderrama, J. C. (1981) The simultaneous analysis of total nitrogen and total phosphorus in natural waters. *Marine Chemistry*, 10(2), pp. 109–122.

- Van Heukelem, L., & Thomas, C. S. (2001) Computer-assisted high-performance liquid chromatography method development with applications to the isolation and analysis of phytoplankton pigments. *Journal of Chromatography A*, (910), pp. 31–49.
- Verbeek, L., Gall, A., Hillebrand, H., & Striebel, M. (2018) Warming and oligotrophication cause shifts in freshwater phytoplankton communities. *Global Change Biology*, 24(10), pp. 4532–4543.
- Villafañe, V. E., Guendulain-García, S. D., Valadez, F., Rosiles-González, G., Helbling, E. W., & Banaszak, A. T. (2015) Antagonistic and synergistic responses to solar ultraviolet radiation and increased temperature of phytoplankton from cenotes (sink holes) of the Yucatán Peninsula, México. *Freshwater Science*, 34(4), pp. 1282–1292.
- Xu, F.-L. (2008). Trophic Classification for Lakes. In *Encyclopedia of Ecology*, Vol. 1, pp. 3594–3601.
- Zadereev, E. S., Boehrer, B., & Gulati, R. D. (2017) Introduction : Meromictic Lakes, Their Terminology and Geographic Distribution. *Ecology of Meromictic Lakes. Ecological Studies (Analysis and Synthesis)*, pp. 1–11.

ANEXOS



Cenote Ucil



Cenote Mumundzonot



Cenote X-Azul



Cenote Lukunchán



Cenote San Miguel



Cenote Buena Esperanza



Cenote X-Labón Subín



Cenote X-Labón Subín 2



Cenote Noh Mozón



Cenote Nayáh



Cenote Suhén