



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE QUINTANA ROO

DIVISIÓN DE CIENCIAS, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

**DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA
MILAGROS, HUAY-PIX, QUINTANA ROO**

TESIS
PARA OBTENER EL GRADO DE
INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTA
BRUNO ARTURO ONOFRE SALOMÓN

DIRECTOR
DR. VÍCTOR HUGO DELGADO BLAS

ASESORES
**DR. ADRIAN CERVANTES MARTÍNEZ
M.E.M JOSÉ LUIS GONZÁLEZ BUCIO
DRA. NORMA ANGÉLICA OROPEZA GARCÍA
DR. RUSSELL GIOVANNI UC PERAZA**



ÁREA DE TITULACIÓN

CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, OCTUBRE DE 2022





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE QUINTANA ROO

DIVISIÓN DE CIENCIAS, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

TRABAJO DE TESIS TITULADO

“DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA MILAGROS, HUAY-PIX, QUINTANA ROO”

ELABORADO POR

BRUNO ARTURO ONOFRE SALOMÓN

BAJO SUPERVISIÓN DEL COMITÉ DEL PROGRAMA DE LICENCIATURA Y APROBADO COMO REQUISITO
PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

INGENIERO AMBIENTAL

COMITÉ DE TESIS

DIRECTOR:


DR. VÍCTOR HUGO DELGADO BLAS

ASESOR:


DR. ADRIAN CERVANTES MARTÍNEZ

ASESOR:


M.E.M JOSÉ LUIS GONZÁLEZ BUCIO

ASESOR SUPLENTE:


DRA. NORMA ANGELICA OROPEZA GARCÍA

ASESOR SUPLENTE:


DR. RUSSELL GEOVANNI UC PERAZA



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, OCTUBRE DE 2022



DEDICATORIA

A mis padres, **Adrián Onofre Valle** y **Guadalupe Salomón Saavedra** quienes con esfuerzo, cariño y dedicación me brindaron las herramientas necesarias que me permitieron lograr esta meta. Esta tesis va dedicada a ustedes con mucho cariño como un pequeño reconocimiento a todo esfuerzo.

A mis hermanas **Carolina** y **Pamela** por su apoyo y compañía durante todo este tiempo, por ser el ejemplo y motivación que se puede lograr todo lo que nos proponemos.

AGRADECIMIENTOS

A mi **familia** por acompañarme y brindarme todo su apoyo durante este proceso.

A mi Director de Tesis **Dr. Víctor Hugo Delgado Blas** por la confianza otorgada para el desarrollo de este proyecto, por sus aportaciones y tiempo dedicado para mejorar la calidad de la tesis; así como su infinita espera y paciencia para concluir con este trabajo de investigación.

Al comité supervisor de tesis, **Dr. Adrián Cervantes Martínez, Mtro. José Luis González Bucio, Dra. Norma Angélica Oropeza García y Mtro. Russell Giovanni Uc Peraza** por sus aportaciones realizadas para elevar la calidad del trabajo.

Finalmente agradezco a quienes me brindaron todo su apoyo para poder lograr esta meta **Kary López y Marce Chumacero** siempre estaré agradecido con ustedes, a mis compañeros de carrera que me ayudaron a realizar el muestreo **Alan y Aurelio** y en general a las personas que contribuyeron a mi formación académica y a las que me dieron la oportunidad para desempeñar esta bonita carrera.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
ANTECEDENTES	5
ÁREA DE ESTUDIO	7
JUSTIFICACIÓN	13
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
MATERIALES Y MÉTODOS	15
Transparencia de la columna de agua	18
Trabajo de laboratorio	18
Clorofila a	18
Índice de estado trófico	19
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
Profundidad y Transparencia.	24
Temperatura	26
Oxígeno Disuelto	28
Conductividad	30
pH (potencial de hidrógeno)	32
Clorofila “a”	34
Índice del estado trófico de Carlson (IET)	36

CONCLUSIÓN	46
RECOMENDACIONES	47
REFERENCIAS	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Área de estudio, laguna Milagros, Huay-Pix, Municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo.....	8
Figura 2. Características observadas (24/07/2021) en la periferia norte de la laguna Milagros.	9
Figura 3. Conectividad hidrológica superficial, laguna Milagros, Huay-Pix, Municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo.	11
Figura 4. Red hidrográfica; Dirección de flujo de la laguna Milagros, Huay-Pix, Municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo.	12
Figura 5. Ubicación de los sitios de muestreo en la laguna Milagros, Huay-Pix, Municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo.	16
Figura 6. Variación de la profundidad y transparencia del agua por estación de muestreo en la laguna Milagros	24
Figura 7. Variación de la temperatura superficial del agua por sitio de muestreo de la laguna Milagros.	26
Figura 8. Variación del oxígeno disuelto del agua por sitio de muestreo de la laguna Milagros.	29

Figura 9. Variación de la conductividad del agua por sitio de muestro de la laguna Milagros.	31
Figura 10. Variación del pH del agua por sitio de muestreo de la laguna Milagros.	32
Figura 11. Variación de la Clorofila "a" del agua por sitio de muestreo de la laguna Milagros	35
Figura 12. Correlación Profundidad – Índice de Estado Trófico (IET).....	38
Figura 13. Correlación Transparencia – Índice de Estado Trófico	39
Figura 14. Correlación Temperatura – Índice de Estado Trófico (IET).....	40
Figura 15. Correlación Oxígeno Disuelto – Índice de Estado Trófico (IET).....	41
Figura 16. Correlación Conductividad – Índice de Estado Trófico (IET).....	42
Figura 17. Correlación pH – Índice de Estado Trófico (IET)	43
Figura 18. Correlación Clorofila “a” – Índice de Estado Trófico (IET).....	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas geográficas de los sitios de muestreo de la laguna Milagros, Huay-Pix, municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo	17
Tabla 2. Escala de valores del estado trófico (Carlson 1977; citado en Moreno et al., 2010)	21
Tabla 3. Resultado de los parámetros físico-químicos registrados en la laguna Milagros	23
Tabla 4. Resultado del Índice del Estado Trófico (IET)	37

RESUMEN

El uso de un sistema de clasificación de estado trófico no sólo tiene un interés científico, sino también una aplicación gerencial ya que, los usos deseados del agua son dependientes del estado trófico y de la consiguiente calidad del agua (Salas & Martino, 2001). El presente trabajo analiza y describe el estado trófico de la laguna Milagros, Quintana Roo, por medio de la transparencia de la columna de agua y la concentración de la clorofila "a", así como la caracterización del comportamiento espacial de la laguna a través de variables físico-químicas como temperatura, oxígeno disuelto (OD), pH, conductividad y profundidad. La determinación del estado trófico se realizó a partir de muestras colectadas en 9 estaciones de muestreo definidas con base en la zona de influencia antropogénica, zona de vegetación e influencia de los arroyos de entrada o salida de agua, lo anterior durante la época de secas. De este estudio se derivan las características ambientales que predominan a la laguna Milagros, clasificado como un sistema somero (1.63 m), con aguas cálidas (30.3 °C), pH neutro con tendencia a la alcalinidad (7.17), y aguas bien oxigenadas (15.4 mg/l). Con base en los valores del índice de estado trófico se clasificó a la laguna Milagros como un sistema mesotrófico.

Palabras claves: Calidad del agua, Clorofila a, mesotrófico, Parámetros físico-químicos

INTRODUCCIÓN

La evaluación de los estados tróficos asociados a nutrientes e indicadores de la calidad del agua, constituyen una de las formas más empleadas en el estudio de la contaminación acuática. Los sistemas costeros, según el índice trófico de sus aguas se clasifican en: oligotrófico, que corresponde a aguas claras con bajas concentraciones de nutrientes, poca materia orgánica, baja cantidad de sedimentos en suspensión y una mínima actividad biológica; mesotrófico, caracterizado por aguas con concentraciones mayores de nutrientes y por lo tanto mayor actividad biológica; y el estado eutrófico, que presenta aguas extremadamente ricas en nutrientes con alta productividad biológica (Bastidas, 2011). Es decir que, el estado trófico corresponde a la relación entre el estado de nutrientes en el sistema acuático y el crecimiento de la materia orgánica en el mismo (Moreno *et al.*, 2010).

Una de las amenazas a las que están sujetos los ecosistemas costeros, como lagunas, estuarios y bahías, es el excesivo aporte de nutrientes provenientes de las actividades humanas (Ruiz *et al.*, 2016). Las fuentes de origen antrópico más comunes en el aporte de nutrientes son los drenajes pluviales, descargas de aguas residuales tratadas o sin tratamiento, uso de fertilizantes, asentamientos irregulares ausentes de infraestructura de saneamiento y alcantarillado (Lin *et al.*, 2018).

El incremento en el suministro y disponibilidad de nutrientes principalmente fosforo puede generar graves alteraciones a los ecosistemas acuáticos como es la eutrofización. Tradicionalmente la eutrofización se refería solo a la carga de nutrientes, sus eventuales altas concentraciones en la columna de agua y la alta productividad y biomasa de algas

que podría ocurrir; no obstante, en un concepto más amplio Cooke *et al.* (2005) define el proceso de eutrofización como: “la carga de materia orgánica e inorgánica disuelta y particulada en lagos y embalses a tasas suficientes para aumentar el potencial de alta producción biológica, disminuir el volumen de la cuenca y agotar el OD”.

En términos generales, la eutrofización es un proceso natural, resultado de la descarga normal de nutrientes, sedimento y otros materiales que llegan lentamente a los sistemas acuáticos. Durante dicho proceso, el lago recibe los aportes de nutrientes que, con el paso del tiempo se transforman en un pantano o humedal y al consolidarse se convierte en un sistema terrestre (RAPAL, 2010). Este proceso que resulta irreversible tiene lugar en cientos de miles de años. Sin embargo, actualmente se habla del término “Eutrofización cultural”, la cual hace referencia a la intervención del ser humano en actividades que directa o indirectamente aportan un exceso de contaminantes y nutrientes en los cuerpos de agua acelerando el proceso de eutrofización (Silveiro, 2006 citado en RAPAL, 2010).

Un gran número de indicadores, índices y modelos han sido desarrollados con el objetivo de asesorar acerca del estado trófico y de la calidad de las aguas. La mayoría de ellos se basan en aspectos físicos (turbidez), biológicos (clorofila y composición del fitoplancton) o químicos del agua (nutrientes), lo que permite definir el estado trófico de una masa de agua comparando los datos obtenidos experimentalmente con valores fijos propuestos (Bohn *et al.*, 2011; Gómez, 2013).

Una forma adecuada de conocer el estado trófico del agua en un sistema determinado, es mediante el análisis de la concentración de Clorofila “a”, ya que permite estimar la cantidad de producción primaria por medio de la biomasa del fitoplancton, lo

cual indicará el estado trófico del cuerpo de agua en cuanto a sus niveles de productividad (Ramírez *et al.*, 2006 citado en Pech, 2009); toda vez que proporciona una respuesta casi inmediata a la variabilidad de los nutrientes, lo que propicia que su cuantificación y seguimiento sean indicadores confiables de las variaciones de la biomasa fitopláctica que es la responsable directa de la salud del ecosistema (Contreras-Espinosa *et al.*, 1994).

Cabe señalar que, junto con la concentración de clorofila, otras variables que permiten obtener información adicional acerca del estado trófico de sistemas acuáticos son la concentración de nutrientes, oxígeno disuelto y la transparencia las cuales se relacionan también con la productividad del agua (Cervantes-Martinez, 2005).

Actualmente, los estudios sobre el estado trófico de la laguna Milagros son limitados. Es por ello que el objetivo de este trabajo es evaluar el estado trófico actual de la laguna, analizando la concentración de clorofila “a” y transparencia de la columna de agua, lo que permitirá realizar un diagnóstico general de la calidad del cuerpo de agua lagunar. Proporcionando información que permita orientar estrategias de manejo adecuadas para la laguna Milagros.

ANTECEDENTES

En las zonas tropicales existe poco desarrollo en el estudio limnológico y el análisis del estado trófico de sus sistemas; en México los trabajos de este tipo se han realizado principalmente en la parte centro y norte del país y muy pocos en la región sur (Cervantes-Martinez, 2005). Los estudios enfocados en la determinación del estado trófico dentro de los sistemas lagunares del estado de Quintana Roo son relativamente recientes.

Contreras-Espinosa *et al.* (1994) llevaron a cabo la caracterización del estado trófico en 33 lagunas costeras mexicanas por medio de la concentración de la clorofila “a”, obteniendo valores de concentración de clorofila “a” en la columna de agua desde cantidades pequeñas 0.01 mg/m³ hasta las cercanas a los 100 mg/m³; advirtiendo que existe una relación estrecha entre la cantidad de nutrimentos y la concentración de clorofila “a” en un sistema.

Para el estado de Quintana Roo se describen los siguientes trabajos:

Carrillo (2003) realizó la caracterización de la flora bacteriana y fúngica en la columna de agua del sistema lagunar Bacalar, aunado a lo anterior se determinaron algunos parámetros físico-químicos como: pH, profundidad, salinidad y sólidos totales disueltos.

Pech (2009) describió y analizó el estado trófico de cinco sistemas acuáticos de la isla de Cozumel, por medio de la evaluación de la concentración de clorofila “a” y de variables ambientales como temperatura, conductividad, salinidad, pH, cloruros, concentración de oxígeno disuelto y saturación de oxígeno.

Ortiz (2010) realizó la descripción y análisis del comportamiento espacio-temporal de variables físico-químicas (temperatura, salinidad, pH, oxígeno disuelto y saturación de oxígeno) y estado trófico por medio de la medición de clorofila “a” como indicador de producción primaria en la laguna Colombia, Cozumel, Quintana Roo durante un ciclo anual.

Alpuche (2014) realizó una caracterización limnológica a través de parámetros físico-químicos y la distribución del zooplancton; así como la medición de la clorofila “a” y transparencia para la determinación del índice del estado trófico en la laguna “La Sabana” en la ciudad de Chetumal, Quintana Roo.

Aceves Zayas (2018) analizó la calidad bacteriológica (contaminación por coliformes totales y fecales) en cinco balnearios del sur de Quintana Roo antes, durante y después del periodo vacacional de Semana Santa de 2016. Entre los balnearios estudiados se encuentra la laguna Milagros que de manera general registró los valores más altos de coliformes fecales durante el periodo vacacional y totales durante el periodo post-vacacional.

Lin *et al.*, (2018) llevaron a cabo la caracterización del comportamiento limnológico y morfométrico de la laguna Milagros, a partir de la determinación de los parámetros físico-químicos, la clasificación del sedimento por medio de análisis granulométrico, así como el cálculo de la forma y dimensiones del cuerpo lagunar a través de un estudio morfológico y batimétrico. Indicando que posiblemente este afectada por descargas antropogénicas de origen industrial, agrícola, municipal y/o doméstica.

ÁREA DE ESTUDIO

Laguna Milagros

La laguna Milagros es un cuerpo de agua dulce perenne de forma irregular, con un sistema somero (profundidad promedio de 1.63 m), posee una superficie de 3.13 km², una longitud máxima de 3.63 km, con un ancho máximo de 1.64 km y un volumen de 5,100,156 m³, se ubica en el extremo sur del poblado de Huay-Pix, integrado al núcleo ejidal de Santa Elena (conocido también como Subteniente López), municipio de Othón P. Blanco, Estado de Quintana Roo, a la altura del kilómetro 15 de la Carretera Federal 186 Chetumal - Escárcega, siendo ésta la principal vía de comunicación (Lin *et al.*, 2018). La ubicación geográfica del área de estudio se puede observar en la **Figura 1**.

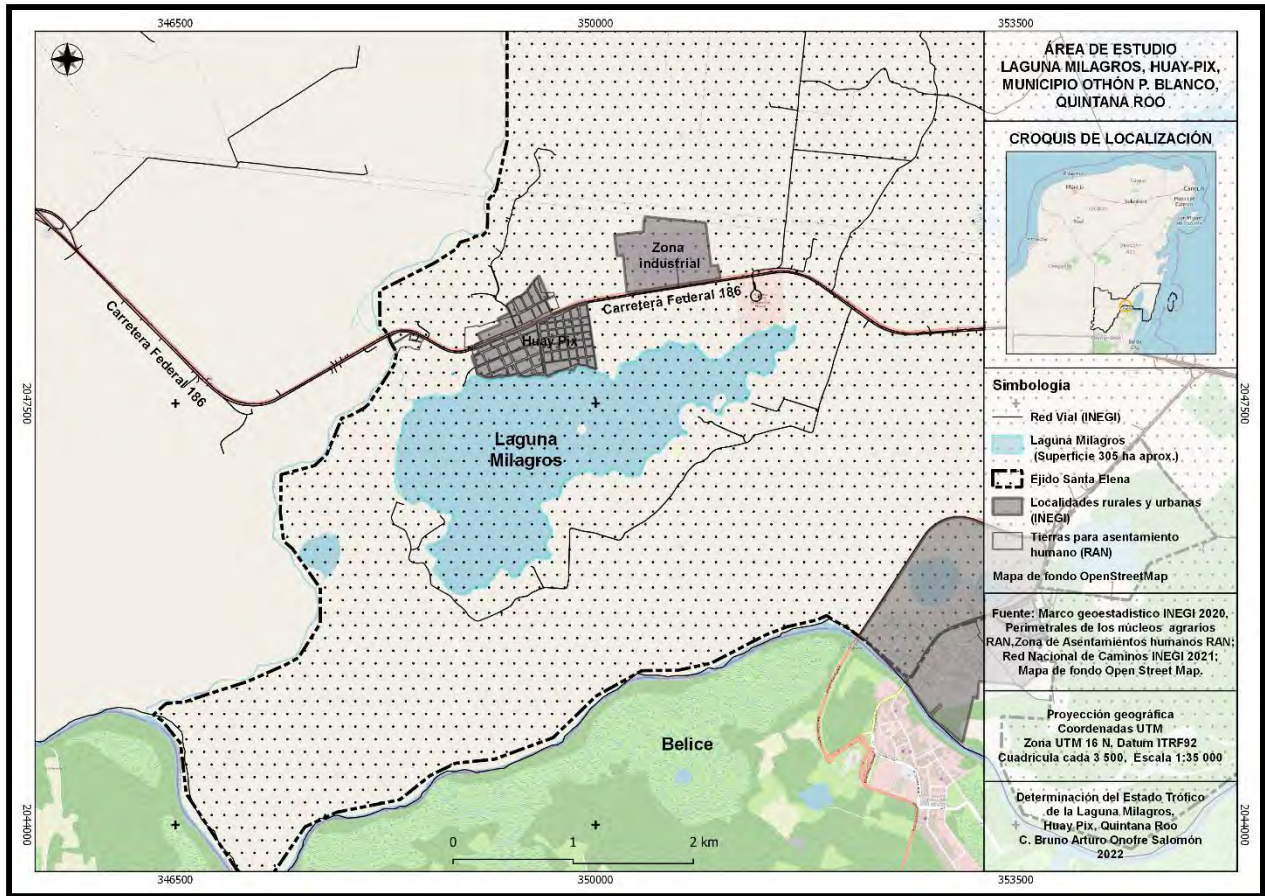


Figura 1 Área de estudio, laguna Milagros, Huay-Pix, Municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo.

En la periferia norte de la laguna Milagros, se observa un paisaje parcialmente fragmentado y modificado antropogénicamente, con un ambiente semiurbano, toda vez que colindante se encuentra el poblado de Huay-Pix, zona que se destaca por el establecimiento de infraestructura enfocada a la oferta de servicio de alimentos y bebidas, desarrollos turísticos, muelles, casas de descanso, renta de pequeñas cabañas y, balnearios públicos y privados, así como las instalaciones abandonadas de lo que fuera el proyecto denominado “Pista de Remo y Canotaje de 2000 metros Laguna Milagros” promovido por la Comisión para la Juventud y el Deporte de Quintana Roo; por

lo que la laguna Milagros es utilizada con fines recreativos y esparcimiento como el nado libre, la práctica de deportes acuáticos como velleo, remo y canotaje, kayak y otras actividades de giro turístico.

Por otro lado, en la periferia sur de la laguna se puede observar algunas alteraciones antropogénicas por cambio de uso de suelo y construcciones en lotes privados colindantes a la laguna; así como la presencia de actividades agropecuarias.

No obstante, lo anterior, se hace notorio que, aunque se ha modificado sustancialmente las condiciones naturales del medio biótico, la laguna Milagros presenta una alta calidad paisajística que aún mantiene continuos de vegetación en el contorno lagunar lo que permite mantener aún los atributos ambientales asociados a la laguna **(Figura 2)**.



Figura 2. Características observadas (24/07/2021) en la periferia norte de la laguna Milagros.

La laguna Milagros corresponde a uno de los recursos hídricos más importantes de la región hidrológica pertenece a la región hidrológica clasificada como RH 33 denominada Yucatán Este (Quintana Roo) y dentro de esta, a la cuenca A conocida como “Bahía de Chetumal y Otras”, subcuenca denominada “Bahía de Chetumal”.

Se encuentra dentro de la **Región Hidrológica Prioritaria (RHP) #110** denominada “Río Hondo”. Siendo que la **RHP** corresponden a las principales subcuencas y sistemas acuáticos en términos de su biodiversidad, patrones sociales y económicos considerando distribución de especies asociadas a cuerpos de agua epicontinentales, vegetación; limnología; aspectos climáticos, geológicos-edáficos, biológicos, antropogénicos y económicos

Por otra parte, forma parte de un gran sistema lagunar, este cuerpo de agua interacciona a través de canales con el río Hondo, que es el único río superficial en Quintana Roo y su curso constituye una frontera geopolítica natural entre México y Belice **(Figura 3)**.

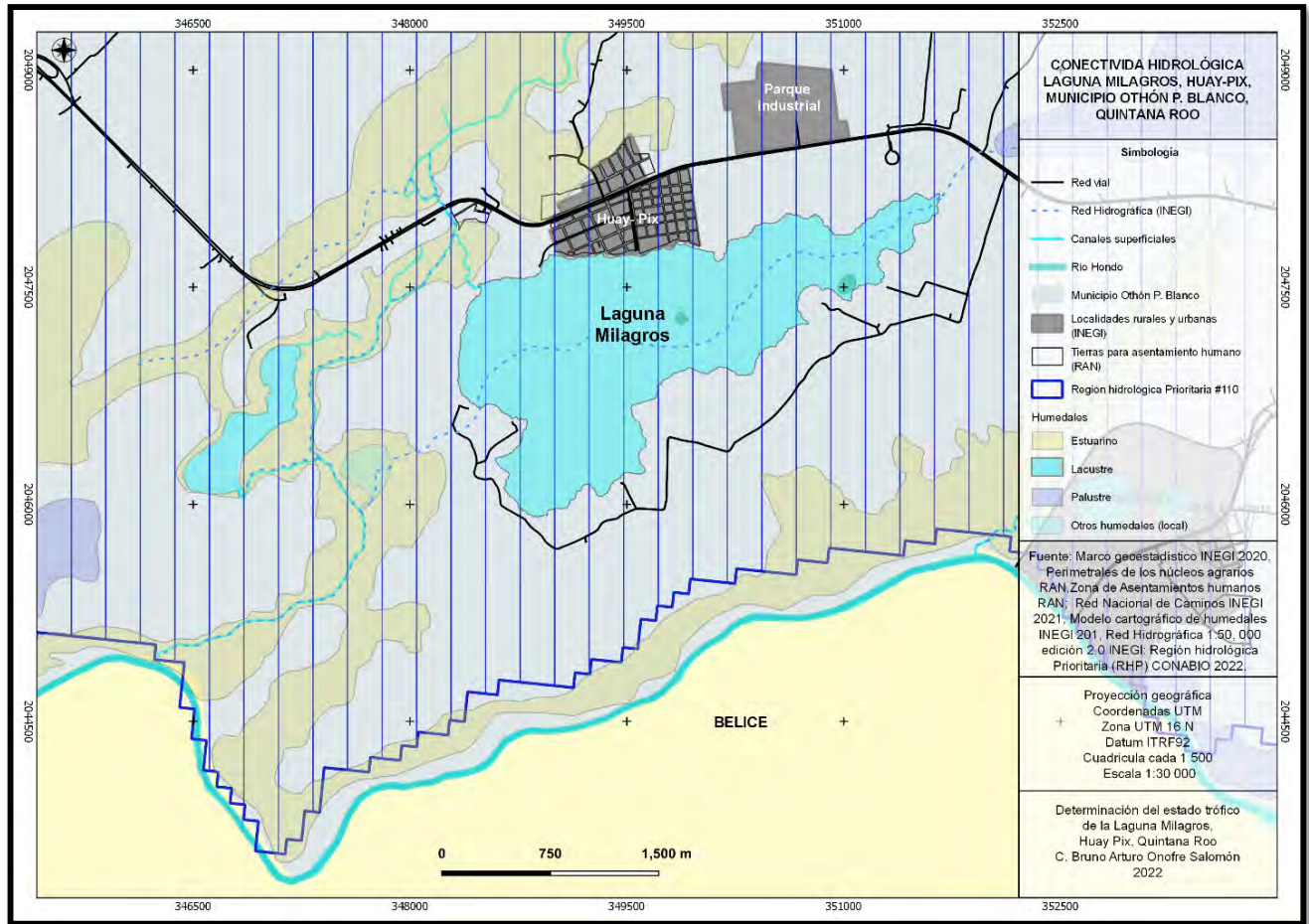


Figura 3. Conectividad hidrológica superficial, laguna Milagros, Huay-Pix, Municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo.

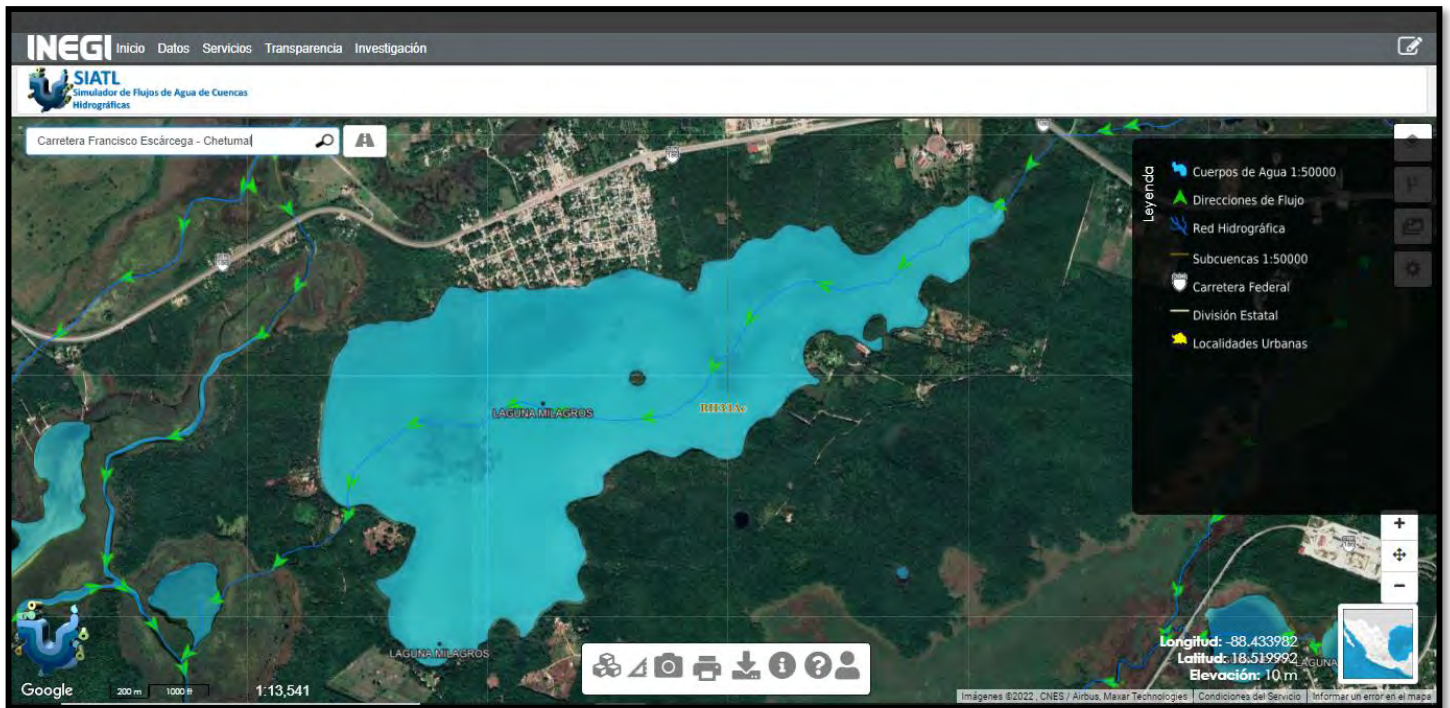


Figura 4. Dirección de flujo de la laguna Milagros, Huay-Pix, Municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo; Red hidrográfica. Tomada de (INEGI, 2022)

El origen de las aguas de la laguna Milagros es por afloramiento natural de nivel estático del agua ya que provienen de manantiales y filtraciones localizados dentro de su propio vaso, y captación directa del agua pluvial; siendo su vaso de formación natural; sus aguas y su vaso por su localización son de origen interior; sus aguas drenan por la parte norte y dan origen al arroyo Milagros (Diario Oficial de la Federación, 1990).

JUSTIFICACIÓN

La mala calidad del agua debido a la eutrofización (principalmente por saneamiento deficiente y mala gestión de los nutrientes) es uno de los problemas más extendidos que afectan el suministro de agua disponible, pesca y actividades recreativas (UNESCO, ONU-AGUA, 2020).

Por otro lado, la falta de educación ambiental, la mala gestión de los recursos de infraestructura de saneamiento, el incremento demográfico desmedido y la falta de interés del gobierno son tan solo uno de los factores de que tales problemas se acentúen.

El uso de un sistema de clasificación de estado trófico no solo tiene un interés científico sino también una aplicación gerencial, ya que los usos deseados del agua son dependientes del estado trófico y de la consiguiente calidad del agua (Salas & Martino, 2001); para ello es de suma importancia conocer con anterioridad el estado trófico en que se encuentra el cuerpo de agua.

Es por ello que, por la importancia que reviste como atractivo turístico y por el núcleo de población establecido en los márgenes de la laguna Milagros, las actividades económicas, turísticas y de recreación que se realizan de manera constante aunado a la riqueza de la fauna y flora que presenta la laguna Milagros; así como la falta de estudios de calidad del agua en la laguna, resulta importante contar con una línea base que proporcione información sobre los niveles tróficos del cuerpo de agua lagunar, que permita orientar y ayudar a tomar decisiones para llevar a cabo acciones de prevención, mejoramiento, conservación, protección o en su caso aprovechamiento sustentable de la laguna.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Objetivo General.

Determinar el estado trófico de la laguna Milagros a través de la cuantificación en la concentración de clorofila “a” y transparencia de la columna de agua, durante la época de secas.

Objetivos Específicos

- Evaluar el comportamiento espacial de variables físico-químicas (Temperatura, pH, Oxígeno Disuelto, Conductividad, Profundidad y Transparencia) en el periodo de secas de la laguna Milagros.
- Analizar la variación espacial de la concentración de la clorofila “a” en la laguna Milagros.
- Evaluar la relación de los parámetros físico-químicos con el estado trófico de la laguna Milagros.

Preguntas de investigación

1. ¿Cuál es el estado trófico de la Laguna Milagros durante la época de secas?
2. ¿Cuál es la variación espacial de la composición físico-química del agua?

MATERIALES Y MÉTODOS

El análisis para la determinación del estado trófico de la laguna Milagros se realizó a través de un muestreo a partir de muestras colectadas durante la época de secas (mayo de 2018). La medición de parámetros físico-químicos (Temperatura, pH, Oxígeno Disuelto, Conductividad, Profundidad y Transparencia) y colecta de muestras para el análisis de clorofila “a” se realizó en 9 sitios de muestreo, las cuales fueron geoposicionadas con el GPS de la ecosonda digital Garmin GPSMAP 400/500 (**Tabla 1**). Los sitios de muestreo se definieron con base en la metodología utilizada por (Lin *et al*, 2018) cuyos criterios de selección fueron determinados con respecto a la zona de influencia antropogénica, zona de vegetación e influencia de los arroyos de entrada o salida de agua (**Figura 5**).

Las muestras colectadas se tomaron a una profundidad de 60 cm de la columna de agua con la ayuda de una botella Van Dorn de 1 litro de capacidad de cerrado automático y se registraron *in situ* los siguientes parámetros físicos: la temperatura del agua (°C) y pH se midieron de forma simultánea utilizando un medidor de pH (con compensación de temperatura) Hanna HI 98130, el oxígeno disuelto (mg/l) con un oxímetro Hanna HI-9142, la conductividad (mS/cm) con un conductímetro Hanna HI-8033, la transparencia con disco de Secci y finalmente la profundidad con la ecosonda GPSMAP 400/500.

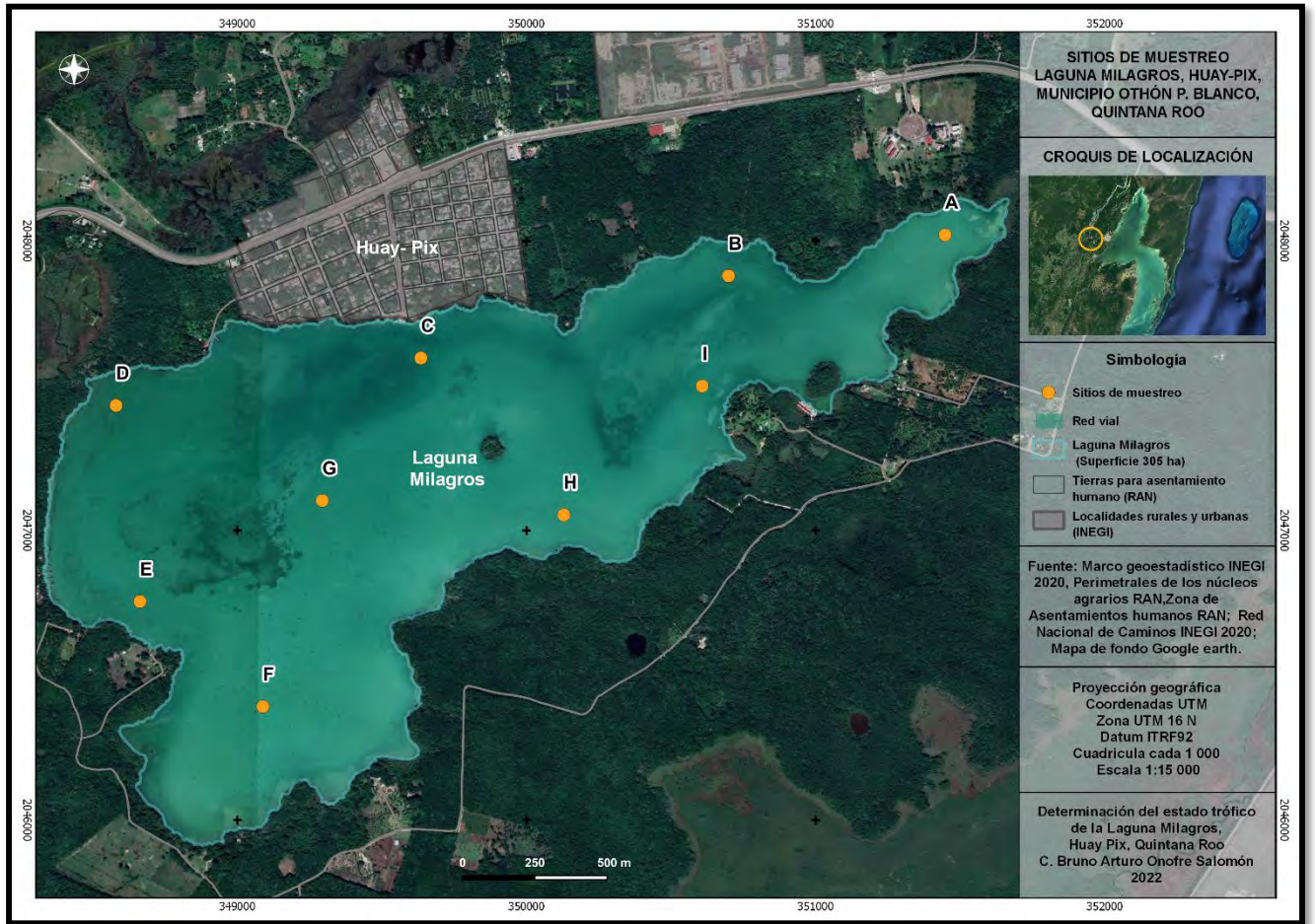


Figura 5. Ubicación de los sitios de muestreo en la laguna Milagros, Huay-Pix, Municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de los sitios de muestreo de la laguna Milagros, Huay-Pix, municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo.

Coordenadas geográficas					
Sitio de muestreo	Grados, minutos, segundos		UTM (WGS84)		Referencia
	Latitud	Longitud	X	Y	
	Norte	Oeste			
A	18°31'03.0"	88°24'26.3"	351447.55	2048020.77	Entrada o salida de arroyo
B	18°30'58.2"	88°24'51.8"	350698.57	2047879.06	Zona de vegetación
C	18°30'48.7"	88°25'28.0"	349634.64	2047595.37	Zona de influencia antropogénica
D	18°30'43.1"	88°26'03.9"	348580.42	2047431.56	Entrada o salida de arroyo
E	18°30'21.1"	88°26'00.9"	348663.03	2046754.54	Zona de influencia antropogénica
F	18°30'09.4"	88°25'46.3"	349088.37	2046391.47	Zona de vegetación
G	18°30'32.6"	88°25'39.5"	349293.45	2047103.09	Zona de vegetación
H	18°30'31.2"	88°25'11.0"	350128.97	2047053.46	Zona de vegetación
I	18°30'45.8"	88°24'54.8"	350607.60	2047498.55	Zona de influencia antropogénica

Transparencia de la columna de agua

La transparencia se midió con el disco de Secchi, que es una herramienta de aproximadamente 30 centímetros de diámetro, dividido en cuartos, pintados de blanco y negro alternativamente para mejorar el contraste. Se realizó sumergiendo el disco en forma vertical dejándolo caer poco a poco y registrando el valor de transparencia en el instante que el disco deja de ser visible desde la superficie. Los muestreos se realizaron en el horario comprendido entre las 10:00 y las 13:00 horas, horario que facilita un mayor ángulo de incidencia de los rayos solares, necesario para la medición de variables que implican el uso de la luz natural, tales como la transparencia y el color del agua.

Trabajo de laboratorio

Las muestras para la determinación de la concentración de la clorofila “a” fueron colectadas en envases de plástico de 1 L, previamente rotulados. Adaptados con papel aluminio y fueron depositados en hielera de tal manera que sean lo más adecuado para la preservación de la muestra, para transportarse al laboratorio de química de la Universidad de Quintana Roo, sitio en el que se llevó a cabo el análisis para determinación de clorofila “a” de cada muestra.

Clorofila a

Para determinar la clorofila “a” se siguió la técnica de Strickland & Parsons (1972), filtrando 1 litro de agua de cada estación de muestreo a través de filtros Millipore con apertura de poro de 0.45 μm utilizando un sistema de vacío, agregando dos gotas de solución de carbonato de magnesio para evitar la acidificación del filtro; una vez filtrada la muestra, se colocó el filtro en un tubo de ensayo con 5 ml de acetona al 90%, el tubo

de ensayo se envolvió en papel aluminio con la finalidad de evitar que la clorofila se degrade por la luz y se dejó reposar toda la noche en el refrigerador. Posteriormente las muestras se introdujeron a una centrifuga marca Solbat C-600 a 1000 revoluciones por minuto por un lapso de 10 minutos para liberar el pigmento. Finalmente se realizaron las lecturas de absorbancia usando el espectrofotómetro marca Hach DR-5000 a diferentes longitudes de onda (663, 645, 630 nm).

La concentración de clorofila “a” en el agua se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$[\text{Cla}], \text{ mg/m}^3 = \frac{\text{Cla} \times \text{Volumen del extracto (ml)}}{\text{Volumen de muestra (l)}}$$

Donde:

$$\text{Cla} = 11.64 (\text{DO}_{663}) - 2.16(\text{DO}_{645}) + 0.10 (\text{DO}_{630})$$

DO_{663} , DO_{645} , DO_{630} = Lecturas de absorbancia.

Índice de estado trófico (IET o TSI¹)

El índice de estado trófico (IET o TSI) de Carlson (1977), es uno de los más utilizados, varía entre 0 y 100, es decir, de oligotrófico a hipertrófico (Tabla 2). Se obtiene a través de la transparencia determinada con el disco de Secchi, la concentración de clorofila “a” y el fósforo total; con una ecuación propia para cada uno de estos

¹ Trophic state index por sus siglas en ingles.

parámetros. Sin embargo, la ecuación basada en la cantidad de clorofila “a” fue la más aceptada.

La evaluación del IET se determinó a través de la transparencia (metros) de la columna de agua y concentración de la clorofila “a” (mg/m³). Los cálculos se hicieron por medio de las siguientes ecuaciones matemáticas:

$$IET (SD) = 60 - 14.41 \ln (SD)$$

Donde **SD** = Profundidad de lectura del disco de Secchi en metros

$$IET (CHL) = 9.81 \ln(CHL) + 30.6$$

Donde **CHL** = Concentración de clorofila “a”

De esta manera el resultado total del índice de estado trófico será igual a la suma del índice de Clorofila “a” más la profundidad de lectura de disco de Secchi dividido entre dos.

Tabla 2. Escala de valores del estado trófico (Carlson 1977; citado en Moreno *et al.*, 2010)

Estado de eutrofia	TSI	Transparencia DS (m)	Clorf a (mg/m ³)
	0	64	0.04
Oligotrófico (TSI < 30)	10	32	0.12
	20	16	0.34
	30	8	0.94
Mesotrófico (30 < TSI < 60)	40	4	2.6
	50	2	6.4
	60	1	20
	70	0.5	56
Eutrófico (60 < TSI < 90)	80	0.25	154
	90	0.12	427
	100	0.12	427
Hipereutrófico (90 < TSI < 100)			

Análisis estadístico

Para estudiar la relación entre el estado trófico y los parámetros fisicoquímicos se realizó análisis mediante prueba de Pearson utilizando el Software de R (R Core Team, 2022). Con el fin de conocer las variables que se encuentran fuertemente relacionadas. El software R utilizado identifica automáticamente las correlaciones que tienen alguna influencia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parámetros Físico-Químicos en la laguna Milagros

En la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos en las mediciones de los parámetros “*in situ*” registrados en la laguna Milagros durante la época de secas, así como el valor promedio de cada uno.

Tabla 3. Resultado de los parámetros físico-químicos registrados en la laguna Milagros

Estación	Profundidad (m)	Transparencia (m)	Temperatura (°C)	Oxígeno Disuelto (mg/l)	Conductividad mS/cm	pH	Clorofila “a” (mg/m³)
A	1.1	1.1	31.1	16.0	1.60	6.19	11.21
B	1.9	1.35	29.8	15.8	1.58	6.65	0.899
C	2.1	0.94	31	15.6	1.50	7.60	0.042
D	1.8	1.16	29.4	15.2	1.56	7.69	12.41
E	1.6	0.77	31.8	15.1	1.70	7.79	9.33
F	1.2	0.81	30.6	14.9	1.40	7.95	2.61
G	1.6	1.31	30.5	15.3	1.51	7.17	8.72
H	1.5	0.89	29.8	15.6	1.40	6.59	11.36
I	1.9	1.14	29	15.8	1.40	6.94	16.85
Promedio	1.63	1.05	30.3	15.47	1.51	7.17	8.16
Desviación Estándar	0.33	0.21	0.90	0.37	0.10	0.61	5.74
Mínimo	1.1	0.77	29	14.9	1.40	6.19	0.042
Máximo	21	1.35	31.8	16.0	1.70	7.95	16.85

Profundidad y Transparencia.

La laguna Milagros presenta una profundidad promedio de 1.63 metros, encontrándose la profundidad máxima en la estación **C** con 2.1 m y la menor en la estación **A** con 1.1 m. Mientras que la transparencia presentó un promedio de 1.05 m, siendo la estación **B** la que presentó la mayor transparencia con 1.35 m a una profundidad de 1.9 m, no obstante, en la estación **A** se presentó una transparencia total (1.1 m); mientras que la menor transparencia se presentó en la estación **E** con 0.77 m a una profundidad de 1.6 m (**Figura 6**).

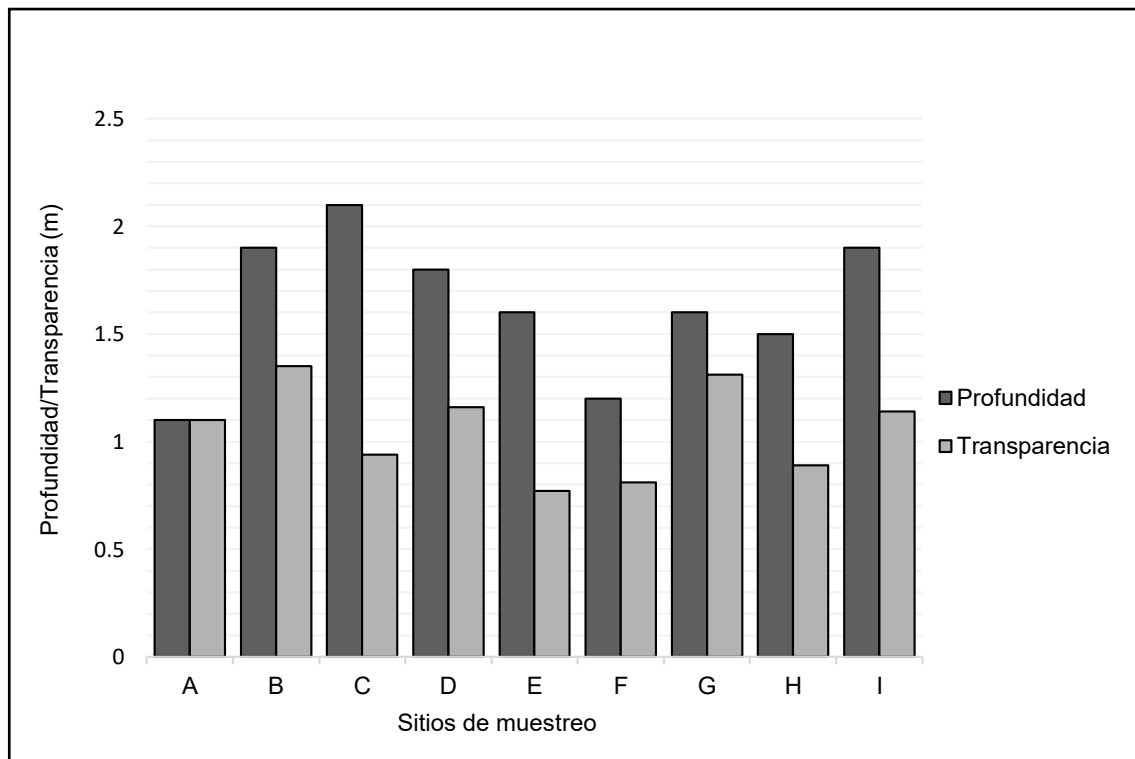


Figura 6. Variación de la profundidad y transparencia del agua por estación de muestreo en la laguna Milagros

La determinación de la profundidad es un parámetro útil ya que los estudios muestran que las comunidades de algas, invertebrados acuáticos y peces son generalmente más productivos en los cuerpos de agua poco profundos (Montoya *et al.*, 2011). Señalando que los lagos someros y pequeños son más susceptibles a la eutrofización por su escaso volumen y capacidad de procesamiento del exceso de materia orgánica.

Cabe remarcar que, bajo condiciones naturales, en un lago somero de clima tropical puede tardar menos tiempo el proceso de eutrofización debido a factores propios como la evaporación y la duración de la luz solar que son más prolongados que en las regiones templadas (Silveiro, 2006 citado en RAPAL, 2010).

Por otra parte, la transparencia es uno de los parámetros básicos a considerar, al caracterizar la calidad de la columna de agua, resulta un parámetro indirecto para medir la productividad biológica de un cuerpo de agua, dado que los resultados suelen mostrarse en función de la concentración de clorofila "a" y por lo tanto biomasa algal. Esto es con base a que los organismos del fitoplancton que absorben la luz y por lo tanto afectan la penetración de esta en la columna de agua. De esta manera, a medida que se incrementa la presencia de estos organismos disminuye la transparencia (Juri *et al.*, 2018).

El valor promedio de la profundidad y transparencia en este estudio son similares a los reportados por Lin *et al.*, (2018) para la laguna Milagros. Las variaciones entre cada zona depende principalmente de las características propias de cada ecosistema, así como a la época del año; al respecto Lin *et al.*, (2018) describió la laguna Milagros como un sistema con aguas turbias cuyo comportamiento puede estar relacionado con la

presencia de sustancias orgánicas disueltas, fitoplancton, sólidos suspendidos o partículas orgánicas disueltas del fondo o lavado desde la tierra circundante o traídos por el viento y lluvia; así como la geología y fisiografía de la cuenca, los cuales influyen sobre las características del cuerpo de agua y las variaciones estacionales.

Temperatura

La temperatura del agua fluctuó entre una mínima de 29 °C, registrada en la estación I y una máxima de 31.8 °C, registrada en la estación E (**Figura 7**). El valor promedio de la temperatura superficial del agua para la laguna Milagros fue de 30.3 °C.

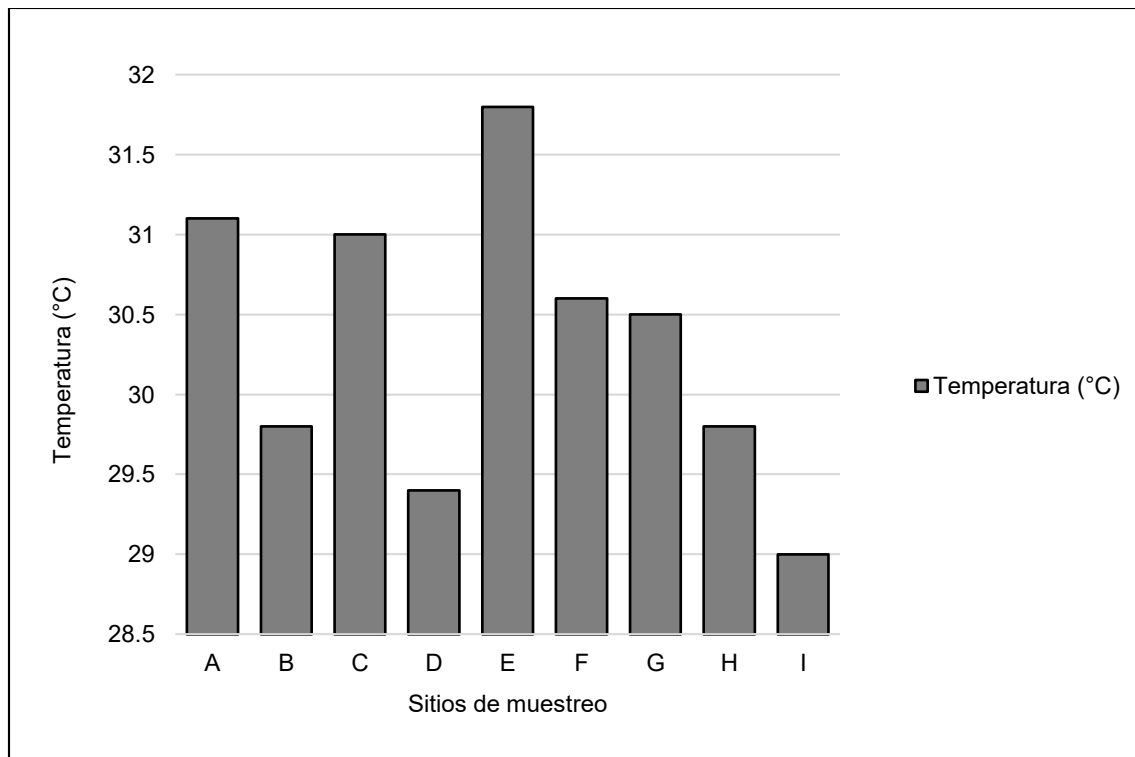


Figura 7. Variación de la temperatura superficial del agua por sitio de muestreo de la laguna Milagros.

La temperatura del agua es un indicador de la calidad y salud del ecosistema, siendo indudablemente de las variables ecológicas más importantes debido a su influencia en la mayoría de los procesos vitales para los organismos, procesos fotosintéticos, remineralización de la materia orgánica y liberación de nutrientes (Loja, 2013; Betancourt *et al.*, 2009; Beltran *et al.*, 2012).

Además, está relacionada directamente con la tasa fotosintética de las plantas y las características reproductivas de los organismos acuáticos, pues a medida que la temperatura del agua sube, aumenta el grado de fotosíntesis y crecimiento de plantas, de tal forma que demanda mayor cantidad de oxígeno para cumplir los procesos fotosintéticos. Como consecuencia, se reduce la cantidad de oxígeno disponible para los organismos, los peces e insectos acuáticos que se vuelven más vulnerables a enfermedades, producto del proceso de Eutrofización (Loja, 2013).

Poco es lo que se ha dicho acerca del efecto de la temperatura sobre la respiración y producción. La interacción entre temperatura, luz y nutrientes son los factores más importantes en el crecimiento del fitoplancton, teniendo un papel importante en la sucesión de especies. Sin embargo, se puede esperar que el efecto de la temperatura en la producción no sea en forma directa, ya que un incremento en la temperatura trae consigo un aumento en la producción y también incrementa los requerimientos respiratorios. Los efectos indirectos de la temperatura están relacionados a la estabilidad de la columna de agua, toda vez que la estructura térmica de la columna de agua tiene un efecto en la distribución del fitoplancton y nutrientes (López, 1999).

La laguna milagros presentó temperaturas entre los 29 y 31.8 °C, similares a las reportadas por Lin *et al.*, (2018) para la superficie y fondo de la laguna, lo que puede ser

ocasionado por la escasa profundidad de la laguna, favoreciendo un rápido calentamiento de la columna de agua en respuesta a los cambios atmosféricos (radiación solar, vientos, corrientes y precipitación); lo que puede interpretarse que posiblemente en la laguna no se presenta una estratificación térmica y de llegar a existir sería inmediatamente perturbada por el viento, la lluvia o la hora del día, lo cual sugiere que al menos en la temporada de secas la columna de agua es homogénea (Gómez, 2013; Tobón, 2018). Cabe mencionar que las temperaturas que se manifiestan normalmente por arriba de los 30 °C provocan, entre otras cosas una disminución en la solubilidad del oxígeno y un incremento en la salinidad; lo que se refleja en un incremento de la actividad metabólica de los organismos (Contreras-Espinosa *et al.*, 1994).

Oxígeno Disuelto

El valor máximo de oxígeno disuelto se presentó en la estación **A** con un registro de 16 mg/l, mientras que el valor mínimo se registró en la estación **F** con 14.9 mg/l (**Figura 8**). El valor promedio de oxígeno disuelto para la laguna Milagros fue de 15.47 mg/l.

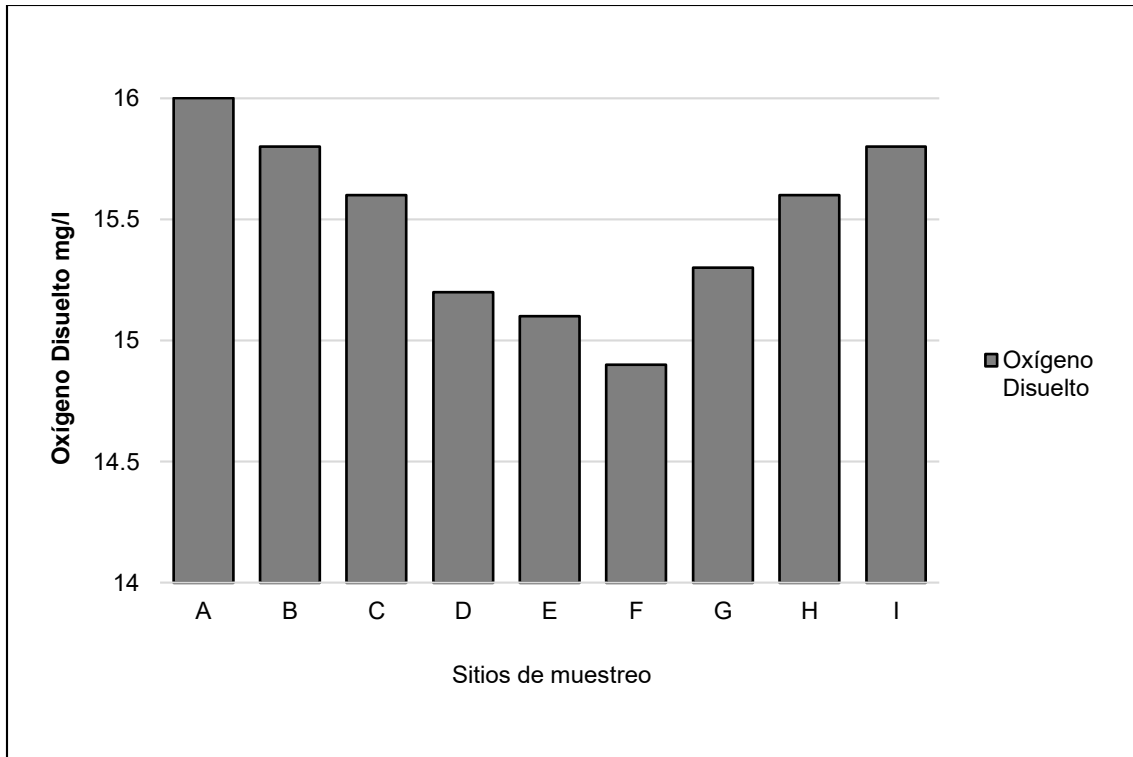


Figura 8. Variación del oxígeno disuelto del agua por sitio de muestreo de la laguna Milagros.

El Oxígeno Disuelto (OD) es la cantidad de oxígeno que está disuelto en el agua y es considerado de los parámetros más importantes ya que condiciona procesos biológicos fundamentales. Generalmente un nivel más alto de OD indica agua de mejor calidad (Loja, 2013).

El oxígeno disuelto en el agua es un factor primordial para la existencia de la biota acuática. En el caso de los ecosistemas lagunares éste procede principalmente de dos fuentes: de la atmósfera y de su generación por los productores primarios principalmente a través de la fotosíntesis; por otro lado, la presencia y difusión de este gas estarán condicionados por la temperatura, salinidad, presión y producción fotosintética (Contreras, 2001).

En todas las estaciones analizadas se obtuvieron niveles de oxígeno disuelto superior a los 12 mg/l (Tabla 3), contrario a lo reportado en la laguna Milagros por Lin *et al.*, (2018) quien registró en la superficie y fondo del cuerpo lagunar valores promedios de 7.15 y 6.28 mg/l respectivamente. Los valores registrados indican un estado de sobresaturación relacionado con sistemas en plena producción fotosintética (Goyenola & Lucía, 2020), esta podría ser una de las causas de los altos valores de oxígeno disuelto, sin embargo, éste no es el caso para la laguna Milagros ya que se estimaron bajas concentración de clorofila “a”.

Por otro lado los vientos, las corrientes y la poca profundidad, hacen que la presencia y abundancia del oxígeno sea usual (Contreras, 2001), lo cual puede explicar comportamientos de aguas bien oxigenadas en el sistema de estudio.

Conductividad

El valor máximo de la conductividad se presentó en la estación **E** con 1.70 mS/cm, mientras que el valor mínimo se registró en las estaciones **F**, **H** e **I** con 1.40 mS/cm (**Figura 9**). El valor promedio de la conductividad para la laguna Milagros fue de 1.51 mS/cm.

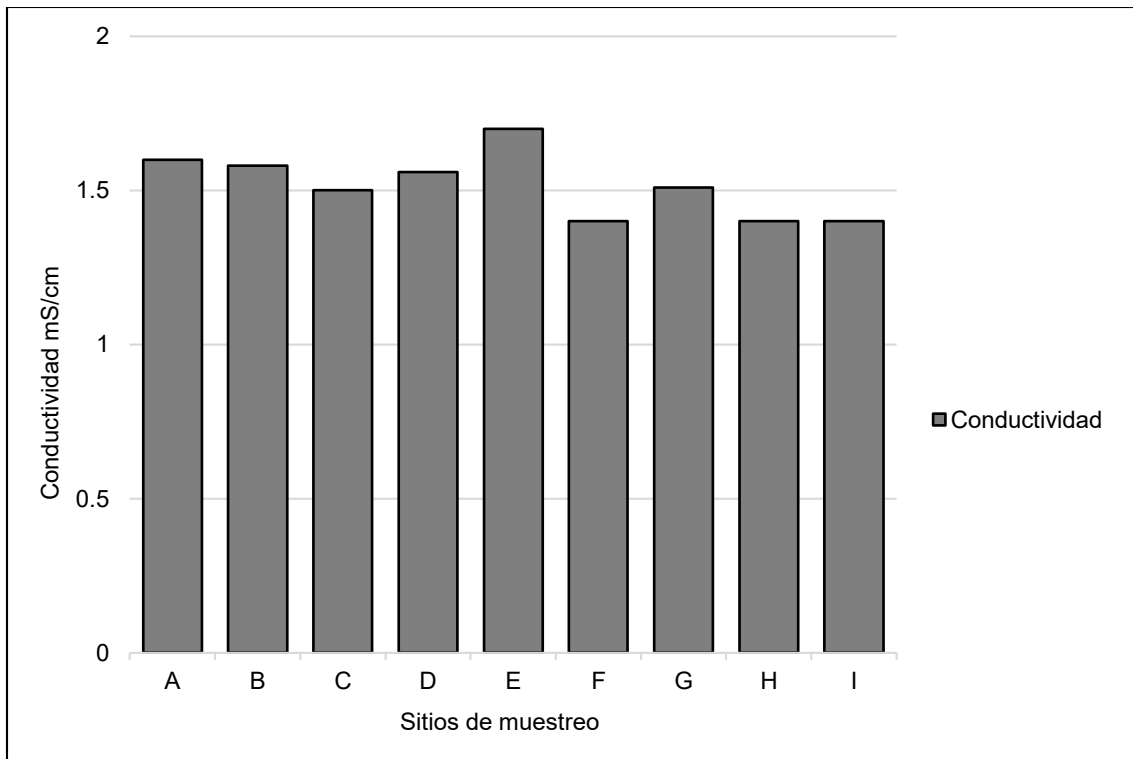


Figura 9. Variación de la conductividad del agua por sitio de muestro de la laguna Milagros.

El valor promedio de conductividad para este estudio fue bajo, similar al valor promedio reportado para la superficie y fondo de la laguna por Lin *et al* (2018); ambos valores son similares a los reportados por Pech (2009) para sistemas dulceacuícolas en la zona norte del estado; esta baja concentración puede explicarse por la naturaleza del agua dulce de la laguna (Cervantes-Martínez, 2008 citado en Pech 2009).

Lo anterior permite inferir que la laguna Milagros presenta características de sistemas dulceacuícolas durante el periodo de estudio, debido a que la conductividad del agua está relacionada con la concentración de las sales en disolución cuya disociación genera iones capaces de transportar la corriente eléctrica (Solís-Castro *et al.*, 2018).

Finalmente, de acuerdo con Roldan & Ramírez (2008) la variación de la conductividad proporciona información acerca de la productividad primaria y descomposición de la materia orgánica, e igualmente contribuye a la detección de fuentes de contaminación, sin embargo, para este estudio no se analizó la productividad primaria por lo que sería importante considerarlo para estudios futuros.

pH (potencial de hidrógeno)

En lo que respecta a las estaciones de muestreo, el valor mínimo encontrado fue en la estación **A** con 6.19 y el valor máximo fue en la estación **F** con 7.95 (**Figura 10**). El promedio de este parámetro para la laguna Milagros fue de 7.17.

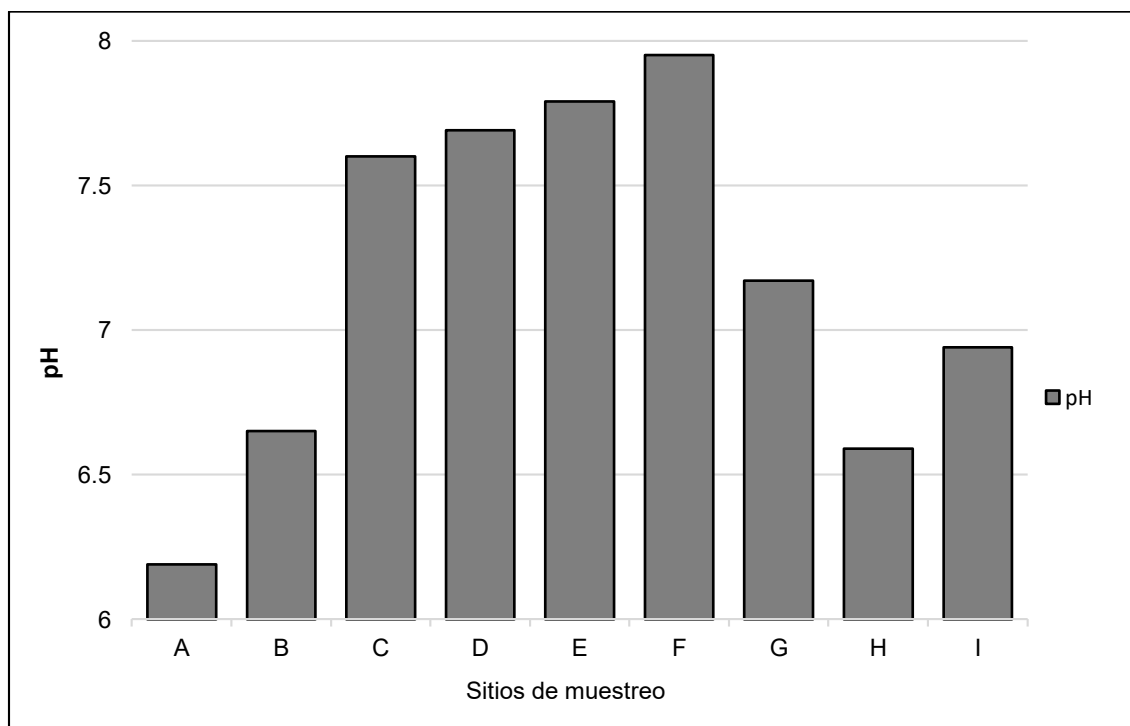


Figura 10. Variación del pH del agua por sitio de muestreo de la laguna Milagros.

Los valores de pH están dados por el intercambio de CO₂ atmosférico y el agua generando ácido carbónico (H₂CO₃). La inestabilidad de este compuesto hace que existan siempre formas carbonatadas disueltas en el agua como carbonatos (CO₃) y bicarbonatos (HCO₃) asociados a elementos de carga positiva (Na⁺, K⁺, Ca⁺⁺). En términos generales, el pH de un cuerpo de agua puede variar a lo largo de un amplio rango de valores, siendo que las variaciones en el pH lagunar son de características locales, en las que intervienen: la calidad de los escurrimientos, la lluvia, la presencia de detritos orgánicos: manglares, pastos marinos y fuentes alóctonas de carbono por los ríos y escurrimientos terrestres, una circulación deficiente, el aislamiento de zonas, la presencia de suelos de origen calcáreo, la actividad biológica de algunos organismos y finalmente algunos procesos biogeoquímicos (Contreras, 2001).

Otro factor que influye en la variación del pH corresponde a una alta producción primaria que ocasiona la liberación de CO₂ y en consecuencia la basificación del medio o elevación del pH (Madrid , 2015). De acuerdo con el promedio obtenido de pH la laguna Milagros corresponde a un sistema de tipo neutro con tendencia a la alcalinidad, lo cual coincide con lo reportado por Lin *et al.* (2018) para la misma laguna; por otra parte a nivel espacial en las estaciones A, H e I, el pH es ligeramente ácido, sin embargo en dichos sitios se registraron concentraciones de Clorofila “a” mayor a 11 mg/m³ mientras que de manera contraria en la estación C el pH es ligeramente básico sin embargo se registró una baja concentración de Clorofila “a”; a diferencia de lo reportado por Alpuche (2014) para la laguna la Sabana donde el pH fue mayor a 7 para todas las estaciones y registros de la clorofila por arriba 20 mg/m³ excepto para 3 estaciones donde la concentración de Clorofila “a” fueron más bajos.

La relación entre ambos parámetros es de importancia ya que la medición de la concentración de la clorofila “a” en el agua ha sido considerada tradicionalmente como índice de la biomasa fitoplanctónica y suele cuantificarse en los estudios relacionados con la productividad primaria (Contreras-Espinosa *et al.*, 1994). Aunque no exista una relación directamente proporcional entre la biomasa fitoplanctónica y la productividad primaria debido, entre otras causas, a la madurez o juventud de la comunidad fitoplanctónica, al estado fisiológico, a la cantidad de feopigmentos y pigmentos accesorios y la variabilidad ambiental, los cuales afectan el proceso de la productividad primaria en mayor o menor medida (Margalef 1974, Contreras-Espinosa y Castañeda-López 2004 citado en Gómez 2013).

Finalmente, otro factor importante en la variación del pH en los cuerpos de agua, está relacionada con el tipo de suelo de la zona de influencia. Se ha reportado que los valores menores a 7 (hacia la acidez) se encuentran íntimamente relacionados con procesos de descomposición de materia orgánica y liberación de ácidos; mientras que los valores mayores a 7 (hacia la alcalinidad) son explicados por la naturaleza química del suelo cárstico de esta región, con reserva alcalina alta y con el predominio de carbonatos y bicarbonatos como sales amortiguadoras (Cervantes-Martinez, 2005).

Clorofila “a”

El valor más alto se presentó en la estación **I** con 16.85 mg/m³ y el valor más bajo en la estación **C** con un 0.042 mg/m³ (**Figura 11**). El promedio de a clorofila “a” para la laguna Milagros fue de 8.16 mg/m³.

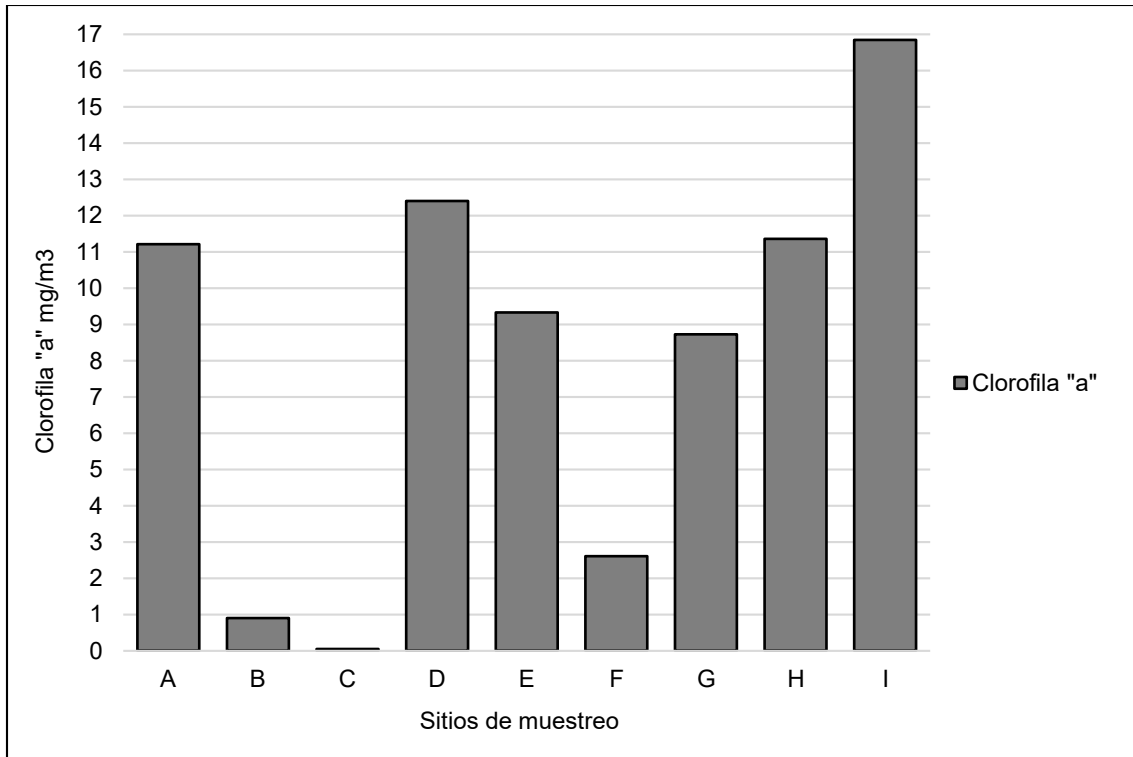


Figura 11. Variación de la Clorofila "a" del agua por sitio de muestreo de la laguna Milagros

La clorofila "a" mostró diferencias de manera espacial, presentando los registros más altos en la estación I, D, H y A, mientras que los más bajos en las estaciones B, C y F; valores parecidos (0.03 a 15.19 mg/m³) fueron reportados por Ortiz (2010) en la laguna Colombia, Cozumel, presentándose los niveles más altos durante la época de lluvias.

La diferencia en la concentración tiene una explicación causal, ya que la cantidad y variación del pigmento corresponde a la de los nutrientes, para el caso de la laguna Milagros Lin *et al.*, (2018), realizó el análisis de nutrientes, amonio (NH₄⁺), nitritos (NO₂⁻) y nitratos (NO₃⁻), registrando las mayores concentraciones de amonio en el fondo que en la superficie para 7 de las nueve estaciones, en cuanto a los nitritos estos se

encontraron dentro del rango permisible con algunos valores indetectables por estar debajo del rango como fue la superficie de la estación F y para el fondo en las estaciones C, H e I; con referencias a los nitratos se detectaron los valores mínimos tanto en la superficie como en el fondo para la estación B, no obstante, concluyó que sus concentraciones sobrepasaron el límite máximo permisible. Por otro lado, Aceves (2018) evaluó la contaminación por coliformes totales y fecales en el balneario de la laguna Milagros registrando la mayor concentración de coliformes totales durante periodo post-vacacional mientras que durante el periodo vacacional se registró la mayor concentración de coliformes fecales. Lo anterior indica que la laguna Milagros recibe tanto aportes de materia orgánica pudiendo ser a través del suelo o la vegetación, así como la descarga de aguas residuales, no obstante las diferencias en la concentración de la clorofila es propiciado por diferentes factores entre los que sobresalen, la dinámica en la circulación lagunas causada por el efecto de la marea, los vientos, la poca profundidad que provoca la resuspensión casi constante, los proceso de regeneración originados por la actividad microbiana de los sedimentos, los flujos de agua provenientes de los ríos y los insumos anormales provocados por las actividades humanas, etc. (Contreras-Espinosa *et al.*, 1994).

Índice del estado trófico de Carlson (IET o TSI)

A continuación, se muestran los valores de IET según el promedio resultado de la suma de la transparencia y cantidad de clorofila “a”; para cada estación de muestreo siendo el valor más bajo en la estación C y el valor más alto en la estación E. El índice de Carlson (1977) presentó un valor promedio de 51.82 (Tabla 4).

Tabla 4. Resultado del Índice del Estado Trófico (IET)

Estación	IET DS*	IET Clor "a"	Promedio IET Ds + Clor "a"	Estado Trófico
A	58.62	54.30	56.46	Mesotrófico
B	55.67	29.55	42.61	Mesotrófico
C	60.89	0	30.44	Mesotrófico
D	57.86	55.30	56.58	Mesotrófico
E	63.76	52.50	58.13	Mesotrófico
F	63.03	40.01	51.52	Mesotrófico
G	56.10	51.84	53.97	Mesotrófico
H	61.67	54.43	58.05	Mesotrófico
I	58.11	58.30	58.2	Mesotrófico
Promedio	59.62	44.02	51.82	Mesotrófico

IET DS= Índice de estado trófico de Disco de Secchi

De manera general la laguna Milagros presentó un índice de **51.82** lo cual indica que en la temporada de secas la laguna Milagros se clasifica como un cuerpo de agua mesotrófico.

Los resultados obtenidos indican que todos los sitios durante la época de muestreo se clasificaron con un estado mesotrófico de modo que la laguna se clasifica en la misma categoría. Los resultados concuerdan con lo reportado por Pech (2009) para el sistema denominado "Sin barda" donde se observan condiciones de un sistema

mesotrófico; por otro lado, los valores observados en el periodo de estudio son menores comparados a los reportados por Alpuche (2014) en la laguna la Sabana donde se presentan condiciones de un cuerpo de agua eutrófico.

Correlaciones

Profundidad – Índice de Estado Trófico (IET)

La **Figura 12** muestra que el coeficiente de correlación de Pearson es $r = -0.54$ este valor representa una relación lineal negativa moderada a través de una regla lineal firme difusa.

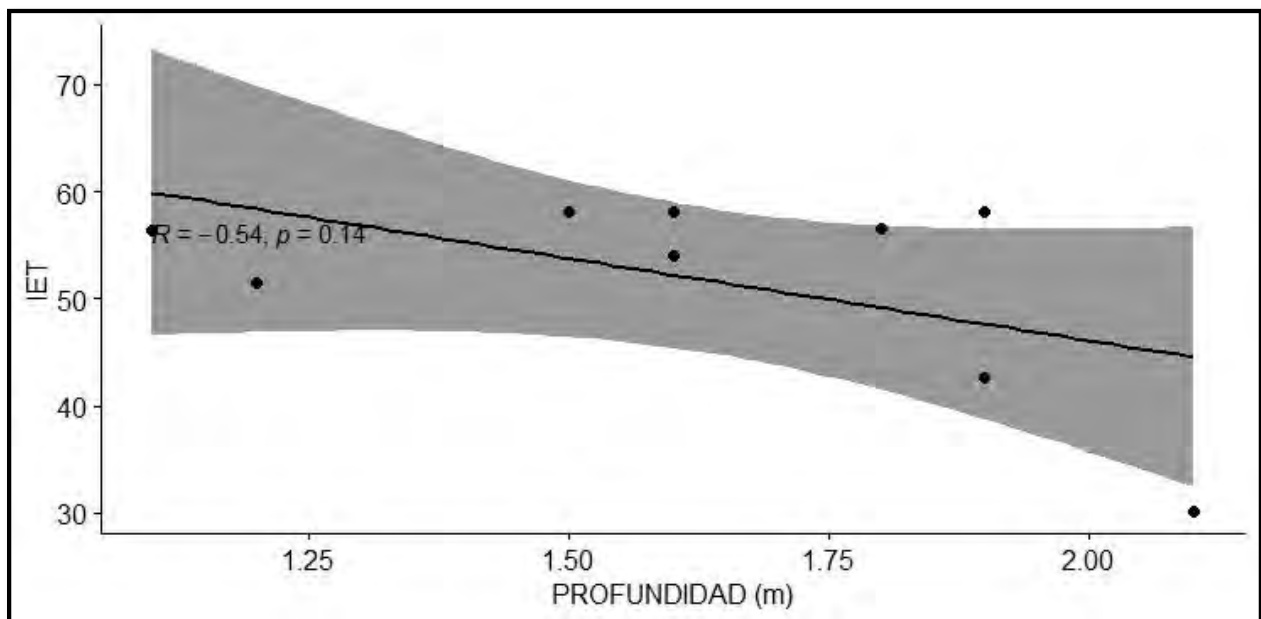


Figura 12. Correlación Profundidad – Índice de Estado Trófico (IET)

Transparencia – Índice de Estado Tráfico (IET)

La **Figura 13** muestra que el coeficiente de correlación de Pearson es $r = -0.074$ este valor representa una relación lineal negativa débil a través de una regla lineal inestable.

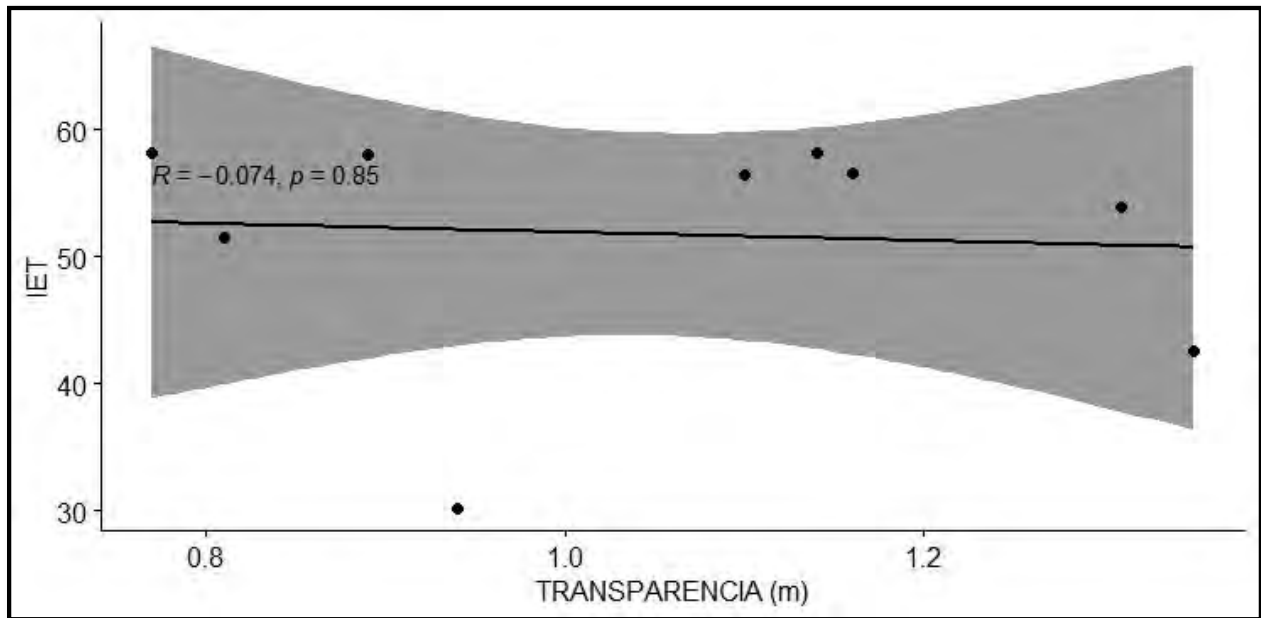


Figura 13. Correlación Transparencia – Índice de Estado Tráfico

Temperatura – Índice de Estado Tráfico

La **Figura 14** muestra que el coeficiente de correlación de Pearson es $r = -0.19$ este valor representa una relación lineal negativa débil a través de una regla lineal inestable.

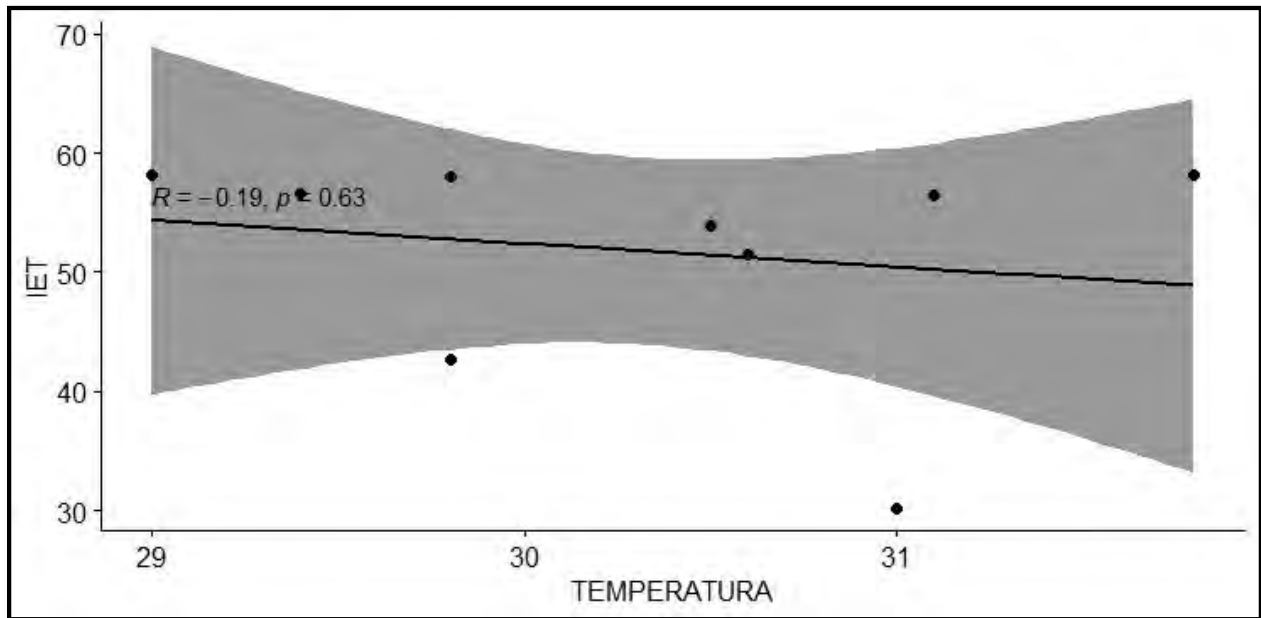


Figura 14. Correlación Temperatura – Índice de Estado Tráfico (IET)

Oxígeno Disuelto – Índice de Estado Trófico (IET)

La **Figura 15** muestra que el coeficiente de correlación de Pearson es $r = -0.15$ este valor representa una relación lineal negativa débil a través de una regla lineal inestable.

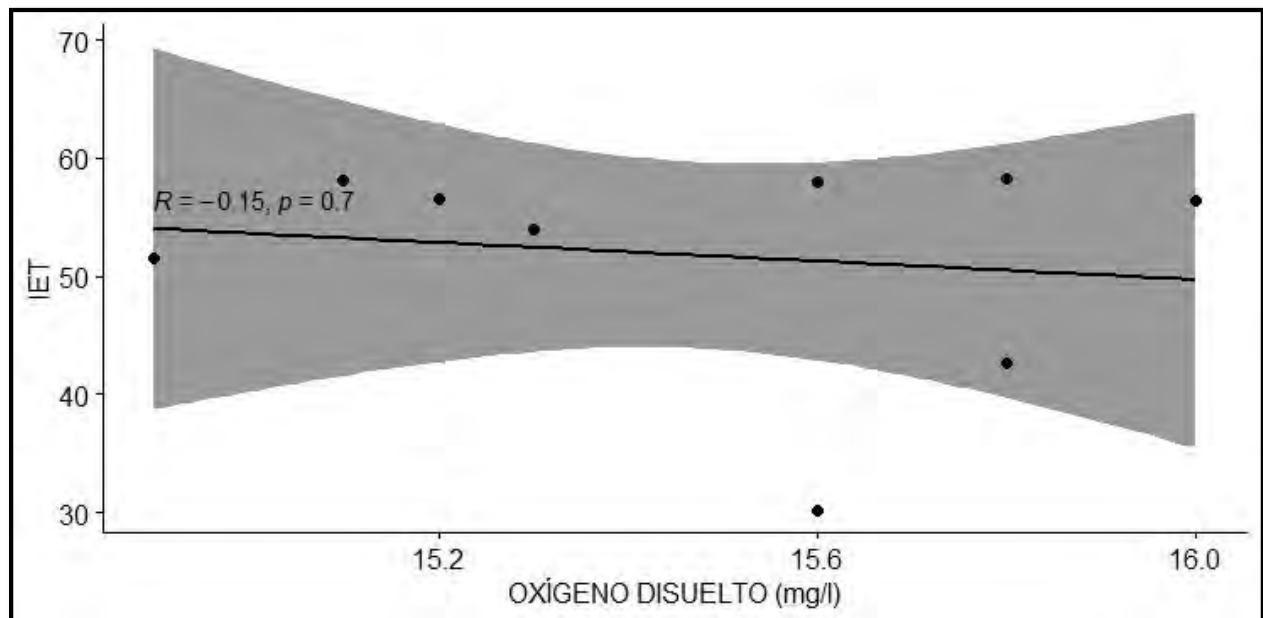


Figura 15. Correlación Oxígeno Disuelto – Índice de Estado Trófico (IET)

Conductividad – Índice de Estado Tráfico (IET)

La **Figura 16** muestra que el coeficiente de correlación de Pearson es $r = 0.0096$ este valor representa una relación lineal positiva débil a través de una regla lineal inestable.

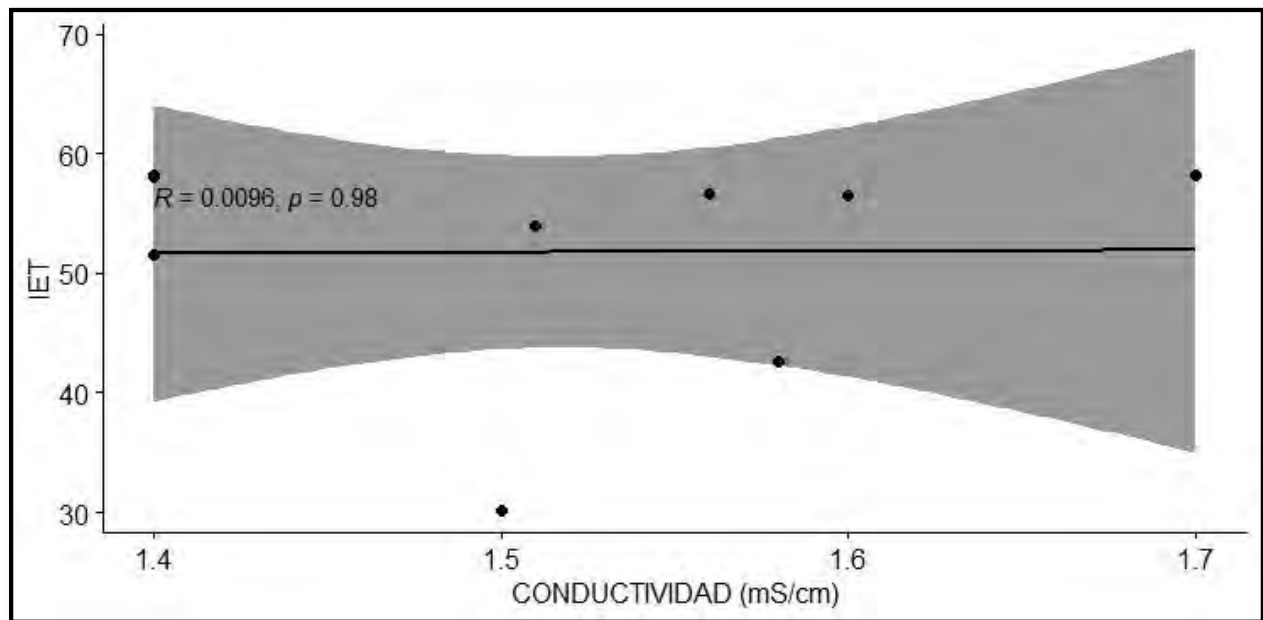


Figura 16. Correlación Conductividad – Índice de Estado Tráfico (IET)

pH – Índice de Estado Trófico (IET)

La **Figura 17** muestra que el coeficiente de correlación de Pearson es $r = -0.17$ este valor representa una relación lineal negativa débil a través de una regla lineal inestable.

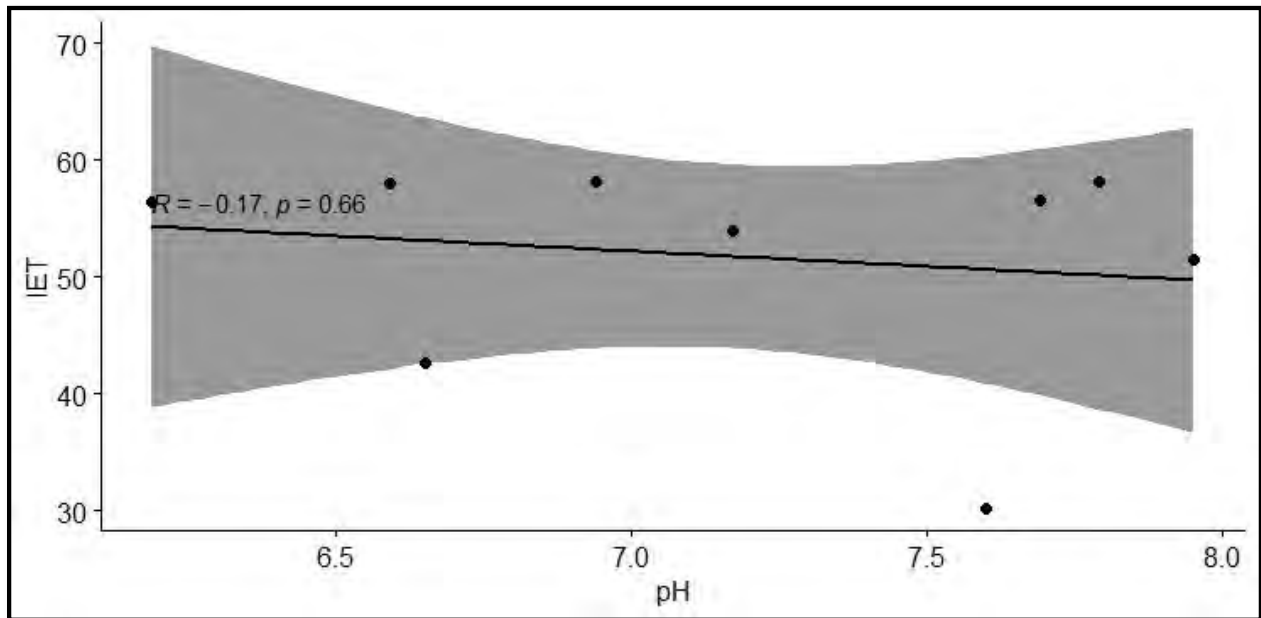


Figura 17. Correlación pH – Índice de Estado Trófico (IET)

Clorofila “a” – Índice de Estado Trófico (IET)

La **Figura 18** muestra que el coeficiente de correlación de Pearson es $r = 0.83$ este valor representa una relación lineal positiva a través de una regla lineal firme

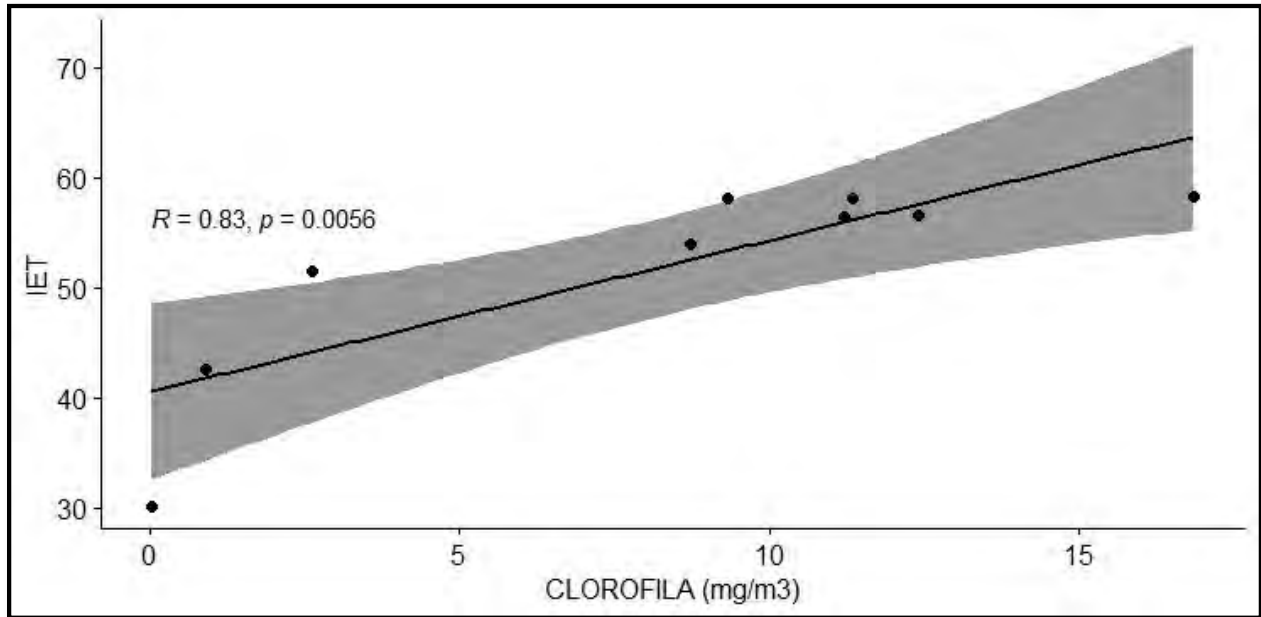


Figura 18. Correlación Clorofila “a” – Índice de Estado Trófico (IET)

Con respecto a los parámetros de profundidad, transparencia, temperatura, oxígeno disuelto, conductividad y pH se observó una correlación débil con el estado trófico.

La correlación más fuerte entre las variables y el estado trófico se observó con la Clorofila “a” (0.83). Como era de esperarse el valor del Estado Trófico incrementa al encontrarse mayor concentración de Clorofila “a” debido a la estrecha relación de la concentración de la clorofila “a” con el estado trófico (Carlson 1977). Lo anterior permite

corroborar que la concentración de la clorofila “a” es un indicativo confiable para el análisis del estado trófico, no obstante que los parámetros restantes no presentaron una relación estrecha con el estado trófico es de suma importancia la inclusión de más variables como la concentración de nutrientes limitantes de la producción algal.

CONCLUSIÓN

Con base a los valores del índice de estado trófico determinado a través de la transparencia y concentración de clorofila “a” permiten clasificar a la laguna Milagros como un sistema mesotrófico durante la temporada muestreada (secas). Sin embargo, es necesario continuar con los estudios en este sistema con la finalidad de determinar una tendencia temporal o anual de su estado trófico.

A nivel espacial, los parámetros físico-químicos analizados presentan una distribución cercana a la normalidad a excepción de la clorofila “a”, por lo que se puede atribuir al sistema condiciones de homogeneidad. De este comportamiento se derivan las características que dominan a la laguna Milagros como un sistema de aguas cálidas, con un pH básico y aguas bien oxigenadas. Los valores de oxígeno disuelto encontrados en la laguna Milagros, sugieren que existen sistemas en plena producción fotosintética.

De manera general, la laguna Milagros puede considerarse como un sistema con una calidad de agua regular, ya que de acuerdo a su clasificación trófica se caracteriza por la presencia de una concentración media de nutrientes y por lo tanto mayor actividad biológica, lo cual es un indicativo de que la laguna está siendo afectada por las actividades antrópicas que se realizan en sus márgenes. Sin embargo, la información base para el sistema es escasa por lo que se desconoce la tendencia que está siguiendo. Por lo tanto, es necesario seguir desarrollando estudios de la calidad del sistema que en conjunto permitan contribuir a la toma de decisiones para un manejo integral de la laguna.

RECOMENDACIONES

Continuar con los estudios durante un ciclo anual con la finalidad de determinar una tendencia estacional o anual del estado trófico y así tener un seguimiento de la salud del sistema.

La incorporación de más variables con el fin de complementar la información del estado trófico, tal como la concentración de nutrientes limitantes como el fosforo de la producción algal.

Estudiar la conectividad hidrológica entre el rio Hondo y laguna Milagros, la cual pudiera influir en el estado trófico de la laguna.

Identificación de fuentes contaminantes difusas o puntuales.

REFERENCIAS

- Aceves Zayas, D. G. (2018). *Evaluación de la contaminación por coliformes totales y fecales en balnearios del sur de Quintana Roo en relación al período vacacional de primavera del 2016* [Tesis de licenciatura, Universidad de Quintana Roo].
- Alpuche, S. (2014). *Caracterización físico-química y del zooplancton en la laguna La Sabana, Quintana Roo* (Tesis de licenciatura, Universidad de Quintana Roo) .
- Bastidas, G. (2011). Evaluación temporal del estado trófico y otros parámetros físicoquímicos de la Bahía de Tumaco. *Boletín Científico CIOH*(29).
- Beltran Álvarez , R., Ramírez Lozano, J. P., & Sánchez Palacios , J. (2012). Comportamiento de la temperatura y el oxígeno disuelto en la presa Picachos, Sinaloa, México. *Hidrobiológica*, 22(1).
- Betancourt, C., Suárez, R., & Toledo, L. (2009). Patrones de distribución temporal de algunas variables físicas y químicas en el embalse Paso Bonito, Cienfuegos, Cuba.
- Bohn, V., Piccolo, M., Pralongo, P., & Perillo, G. (2011). Evaluación del estado trófico de dos lagunas pampeanas (Argentina).
- Carrillo Ruiz, A. A. (2003). *Caracterización de la flora bacteriana y fúngica en la columna de agua del sistema lagunar Bacalar* (Tesis de licenciatura).
- Cervantes-Martinez, A. (2005). Analisis limnológico de dos sistemas cársticos (cenotes) de la Península de Yucatan, México con énfasis en la variación espacial y temporal del zooplancton [Tesis de Doctorado, El Colegio de la Frontera sur] .
- Contreras, F. (2001). Caracterización de lagunas costeras mexicanas a través de variables ecológicas seleccionadas [Universidad Autonoma Metropolitana(Tesis de Doctorado)].
- Contreras-Espinosa , F., Castañeda-López, O., & García-Nagaya, A. (1994). La clorofila a como base par aun índice trófico en lagunas costeras mexicanas. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología Universidad Autonoma de México*. Obtenido de <http://biblioweb.tic.unam.mx/cienciasdelmar/instituto/1994-1-2/articulo438.html>
- Cooke, G. D., Welch, E. B., Peterson, S. A., & Nichols, S. A. (2005). *Restoration and Management of Lakes and Reservoirs*. CRC Press, Taylor & Francis Group .
- Diario Oficial de la Federación. (06 de Septiembre de 1990). DECLARATORIA de propiedad nacional de las aguas de la Laguna Bacalar, arroyo Huay Pix, laguna y arroyo Milagros, Municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo. .

- Gómez, R. (2013). *Ecología del Sistema Lagunar Chantuto-Panzacola, Chiapas, basada en la aplicación e interpretación de algunos índices tróficos, parámetros físico-químicos y biológicos* [Tesis de maestría, El Colegio de la Frontera Sur].
- Goyenola, G., & Lucía, U. (2020). *Guía para el monitoreo participativo de lagos eutróficos urbanos. Ciencia-Gestión-Participación*. Universidad de la República .
- INEGI. (2022). *Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas*. Obtenido de https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/
- Juri, G., Fredes , D., & San Miguel , D. (2018). Análisis de la relación entre la concentración de clorofila "a" y la transparencia de los lagos monitoreados por la red de calidad de la DGA, y elaboración de un ranking de lagos basados en el estado trófico otorgado por estos parámetros. . *Departamento de conservación y protección de recursos hídricos; Dirección General de Aguas*.
- Lin, Y.-L., Delgado-Blas, V., Cervantes-Martínez, A., & Gutierrez-Aguirre, M. (2018). Batimetría y calidad de agua de la laguna Milagros, Quintana Roo, México. *Teoría y Praxis*. 25: 9-30. ISSN 1870 1582.
- Loja, G. (2013). *Determinación de estrategias de conservación en la subcuenca del río Yanuncay mediante el análisis de indicadores de calidad y cantidad de agua* [Tesis de maestría, Universidad del Azuay].
- López , C. (1999). *Variabilidad de la productividad orgánica primaria en el Golfo de California* [Tesis de licenciatura, Universidad de Sonora]. Obtenido de <http://www.bidi.uson.mx/TesisIndice.aspx?tesis=1325>
- Madrid , E. (2015). *Calidad del agua y estado trófico en el lago de Gùija y sus ríos afluentes y efluente para un programa de monitoreo, en el departamento de Santa Ana, El Salvador* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua]. Repositorio. Obtenido de <https://repositorio.unan.edu.ni/10958/1/01048.pdf>
- Montoya Moreno , Y., Vélez, F., & Aguirre Ramírez, N. (2011). Características morfométricas de un lago de plano inundable tropical (cienega Hoyo, Los Bagres, Colombia). *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*(59).
- Moreno, D., Quintero , J., & López, A. (2010). Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. *Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería*(78).
- Ortiz Borges, I. G. (2010). *Caracterización Físico-Química y Producción Primaria de la Laguna Colombia, Cozumel Quintana Roo, México* [Tesis de licenciatura,

- Universidad de Quintana Roo*]. Biblioteca Santiago Pacheco Cruz, Universidad de Quintana Roo.
- Pech Domínguez, C. (2009). *Análisis de la clorofila a durante un ciclo anual en sistemas acuáticos de Cozumel como indicador del estado trófico del agua (2007-2008)* [Tesis de licenciatura, Universidad de Quintana Roo]. Biblioteca UQROO.
- RAPAL. (2010). (Red de Acción en Plaguicidas y sus Alternativas para América Latina) . *Contaminación y eutrofización del agua. Impactos del modelo de agricultura industrial* .
- Roldán, G., & Ramírez, J. (2008). *Fundamentos de limnología neotropical*. Universidad de Antioquia.
- Ruiz, T., Arreola, J., & Morquecho, L. (2016). Índices de eutrofización aplicados en lagunas costeras del Golfo de California. *Entorno Académico Revista de divulgación científica del Instituto Tecnológico Superior de Cajeme*(17).
- Salas , H., & Martino , P. (2001). Metodologías simplificadas para la evaluación de eutrofización en lagos cálidos tropicales. *Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencia del Ambiente (CEPIS)*.
- Solís-Castro, Y., Zuñiga-Zuñiga , L., & Mora-Alvarado, D. (2018). La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 31(1), 35-46.
- Strickland, J., & Parsons, T. (1972). *A Practical Handbook of Seawater Analysis* (Segunda Edición ed.). Fisheries Research Board of Canada.
- Team, R. C. (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. .
- Tobón , N. (2018). Hidroquímica y caracterización del sedimento carbonatado del sur de la laguna de Bacalar [Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica de Yucatan, A.C.].
- UNESCO, ONU-AGUA. (2020). *Informe Mundial de la Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y Cambio Climático*. UNESCO, París.