



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

División de Ciencias e Ingeniería

“CARACTERIZACIÓN LIMNOLÓGICA Y MORFOMÉTRICA DE LA LAGUNA MILAGROS, QUINTANA ROO, MÉXICO”

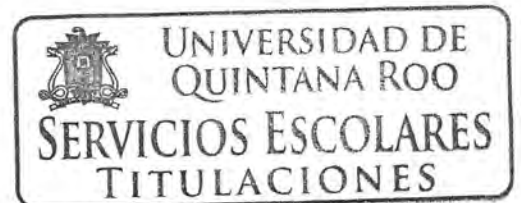
TESIS

Para obtener el grado de

Ingeniero Ambiental

Presenta

YU-LIN LIN



Director de Tesis

Dr. Víctor Hugo Delgado Blas

Chetumal, Quintana Roo, México, Diciembre de 2012.



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

División de Ciencias e Ingeniería

Trabajo de Tesis elaborado bajo supervisión del Comité de Asesoría y aprobada como requisito parcial para obtener el grado de:

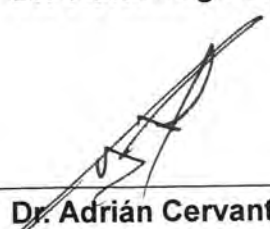
INGENIERO AMBIENTAL

COMITÉ DE TESIS

Director:

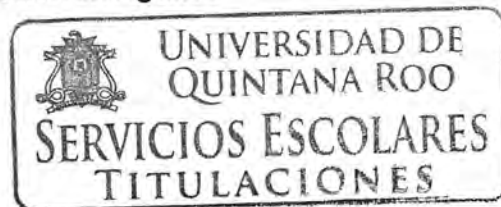

Dr. Víctor Hugo Delgado Blas

Asesor:


Dr. Adrián Cervantes Martínez

Asesora:


Dra. Martha Gutiérrez Aguirre



Chetumal, Quintana Roo, México, Diciembre de 2012.

DEDICATORIA

A mis padres Sam y Susan

por todo su amor y apoyo incondicional, y a formarme como la persona que soy hoy.

A mi hermano

por acompañarme desde la niñez hasta la juventud y hasta ahora.

A mis 'amigos especiales', mejores amigos, y amigos

por compartir su amistad conmigo, por creerme, comprenderme, tolerarme y animarme siempre.

Agradezco a ellos por ser parte de este pequeño logro, de un capítulo de mi vida, todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.

“A veces es difícil expresarse con palabras,
ya que los tesoros más grandes son aquellos invisibles para los ojos,
pero encontrados por el corazón.”

- Yu-Lin Lin -

AGRADECIMIENTOS

La gratitud más grande que tengo es hacia el Creador – Dios por su misericordia y bendición; por darme la oportunidad de vivir y enfrentar diferentes situaciones que me ayudan a autosuperar; por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente; y por haber puesto en mi camino aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante estos 5 años de estudio – por TODO.

Estoy agradecida a mi familia por su amor, apoyo, paciencia y tolerancia durante mis estudios y siempre.

Gracias a la Universidad de Quintana Roo, Unidad Académica Chetumal por aceptarme y brindarme sus facilidades durante mi estancia en la Universidad.

A mi director de tesis Dr. Víctor Hugo Delgado Blas, le agradezco mucho por guiarme, apoyarme y acompañarme durante todo el proceso de mi tesis, por su paciencia en corregirme, por sus sugerencias, comentarios y todos los conocimientos que me ha transmitido, los cuales han posibilitado la realización y el mejoramiento de mi trabajo.

Agradezco muchísimo al Dr. Adrián Cervantes Martínez y a la Dra. Martha Gutiérrez Aguirre por su comprensión, recomendaciones y tiempo dedicado para elevar la calidad de mi tesis.

También quiero agradecer al Dr. José Manuel Carrión Jiménez por apoyarme con el espectrofotómetro y los reactivos, y por sus observaciones para mejorar mi trabajo.

Tengo que agradecer también al CIG de la Universidad de Quintana Roo, en especial a Daniel por su accesibilidad y apoyo en la parte de cartografía en mi tesis.

Gracias a todos mis profesores por compartir sus conocimientos conmigo.

Le debo las gracias a mis compañeros de la generación, fue una generación muy especial, gracias a ustedes: Chio, Mayi, Leyd, Silvis, Yaz, Mara, Pili, Clau, Alo, Edgar y Chay; y gracias a los amigos por acompañarme en uno de mis trabajos de campo.

Al final, quiero agradecer a mí misma por el esfuerzo dedicado para hacer posible este pequeño logro.

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	i
ÍNDICE DE TABLAS	iv
RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	2
ANTECEDENTES.....	4
ÁREA DE ESTUDIO	5
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
Objetivo General.....	7
Objetivos Específicos.....	7
Preguntas de Investigación.....	7
Justificación	8
MATERIALES Y MÉTODOS	9
Parámetros Físico-químicos.....	9
Nutrimentos	10
Granulometría.....	11
Morfometría y Batimetría.....	11
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	15
Parámetros Físico-químicos en la laguna Milagros	15
Profundidad y Transparencia	15
Temperatura.....	17
pH.....	19
Oxígeno disuelto.....	22
Conductividad	25
Nutrimentos	27
Amonio	27
Nitritos y Nitratos.....	30
Granulometría.....	35
Morfometría y Batimetría.....	36
CONCLUSIONES	41
RECOMEDACIONES	42
LITERATURA CITADA.....	43
PROGRAMAS.....	47
ANEXOS.....	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Área de Estudio

Fig. 1. Mapa de la ubicación de la laguna Milagros	6
--	---

Materiales y Métodos

Fig. 2. Localización de los nueve sitios de muestreo de la laguna Milagros	10
Fig. 3. Transectos para la realización del levantamiento batimétrico	13
Fig. 4. Cambios en los valores del índice de desarrollo del volumen (V_d) como consecuencia de las variaciones en la morfometría de la laguna.....	14

Resultados y Discusión

Fig. 5. Transparencia de la laguna Milagros en las estaciones de muestreo.....	15
Fig. 6. Distribución de la temperatura del agua en la superficie (S) por estación de muestreo.....	18
Fig. 7. Distribución de la temperatura del agua en el fondo (F) por estación de muestreo.....	18
Fig. 8. Variación de la temperatura del agua en la superficie (S) y fondo (F) por estación de muestreo.....	19
Fig. 9. Comportamiento del pH del agua en la superficie (S) por estación de muestreo.....	20
Fig. 10. Comportamiento del pH del agua en el fondo (F) por estación de muestreo.....	20
Fig. 11. Variación del pH del agua en la superficie (S) y fondo (F) por estación de muestreo.....	21

Fig. 12. Comportamiento del oxígeno disuelto del agua en la superficie (S) por estación de muestreo.....	23
Fig. 13. Comportamiento del oxígeno disuelto del agua en el fondo (F) por estación de muestreo.....	23
Fig. 14. Variación del oxígeno disuelto del agua en la superficie (S) y fondo (F) por estación de muestreo.....	24
Fig. 15. Distribución de la conductividad del agua en la superficie (S) por estación de muestreo.....	25
Fig. 16. Distribución de la conductividad del agua en el fondo (F) por estación de muestreo.....	26
Fig. 17. Variación de la conductividad del agua en la superficie (S) y fondo (F) por estación de muestreo.....	26
Fig. 18. Concentración de amonio en la superficie (S) por estación de muestreo.....	29
Fig. 19. Concentración de amonio en el fondo (F) por estación de muestreo.....	29
Fig. 20. Variación de la concentración de amonio en la superficie (S) y fondo (F) por estación de muestreo	30
Fig. 21. Concentración de nitritos en la superficie (S) por estación de muestreo.....	31
Fig. 22. Concentración de nitritos en el fondo (F) por estación de muestreo.....	31
Fig. 23. Variación de la concentración de nitritos en la superficie (S) y fondo (F) por estación de muestreo	32

Fig. 24. Concentración de nitratos en la superficie (S) por estación de muestreo.....	33
Fig. 25. Concentración de nitratos en el fondo (F) por estación de muestreo.....	34
Fig. 26. Variación de la concentración de nitratos en la superficie (S) y fondo (F) por estación de muestreo	34
Fig. 27. Tipos de sedimentos de la laguna Milagros en las estaciones de muestreo.....	35
Fig. 28. Mapa batimétrico de la laguna Milagros	37
Fig. 29. Medición de la longitud (3.63 km) y ancho máximo (1.65 km) de la laguna Milagros mediante el <i>Google Earth</i>	38
Fig. 30. Medición del área total (3.13 km ²), área superficial (3.12 km ²) y perímetro (11.1 km) de la laguna Milagros mediante el <i>Mapa Digital de México</i>	39

Anexos

Anexo 2. Botella Van Dorn de 1 L de capacidad.....	49
Anexo 3. Espectrofotómetro portátil Hach DR/2010	49
Anexo 4. Tamizador (rotor) tipo RX-29	49
Anexo 5. Ecosonda digital Garmin GPSMAP 421s	49

ÍNDICE DE TABLAS

Materiales y Métodos

Tabla 1. Coordenadas geográficas de las estaciones de muestreo de la laguna Milagros, Huay-Pix, Q. Roo.....	10
---	----

Resultados y Discusión

Tabla 2. Promedio general de los parámetros físico-químicos y nutrimentos	16
Tabla 3. Resultados de los parámetros morfológicos y morfométricos de la laguna Milagros, Huay-Pix, Q. Roo.....	36

Anexos

Anexo 1. Cálculos de los resultados de los parámetros morfométricos.....	48
--	----

RESUMEN

En el siguiente trabajo se realizó un estudio sobre la caracterización del comportamiento limnológico y morfométrico de la laguna Milagros del poblado Huay-Pix, en el sur de Quintana Roo, México. El estudio se realizó a partir de la determinación de los parámetros físico-químicos (transparencia, temperatura del agua, pH, oxígeno disuelto y conductividad) y nutrimentos (amonio, nitritos y nitratos), un análisis granulométrico, un mapa batimétrico y un estudio morfométrico (longitud máxima, ancho máximo, área total, perímetro o longitud de la línea de costa, área superficial, ancho medio, índice de desarrollo de la línea de costa, profundidad máxima, profundidad media, profundidad relativa, volumen e índice de desarrollo del volumen) de la laguna Milagros, mostrándose algunas relaciones entre los parámetros morfométricos y las características de la laguna. Los parámetros físico-químicos y nutrimentos muestran que la laguna Milagros se caracteriza como un cuerpo de agua perenne, con un sistema somero (profundidad media 1.63 m), con aguas cálidas (promedio 28.9°C) y turbias, con pH neutro tendiendo hacia la acidez, con aguas bien oxigenadas (5.5 a 8.03 mg/l), y con conductividad entre 1.61 y 3.53 mS/cm. La concentración de amonio fue entre 1.27 y 3.33 mg/l; el nitrito alcanzó 0.009 mg/l con algunos valores indetectables, y el nitrato se encontró en altas concentraciones de 0.5 hasta 1.6 mg/l. Los resultados obtenidos del análisis granulométrico muestran que el tipo de sedimento predominante es la arena gruesa. El mapa batimétrico y el estudio morfométrico muestra que la laguna Milagros presenta una forma irregular, con la cubeta en forma de un cono invertido; su longitud máxima es de 3.63 km y su ancho máximo es de 1.64 km, con un área total de 3.13 km² y volumen de 5,100,156 m³.

Palabras clave: Batimetría, morfometría, nutrimentos, físico-químico, sedimento, Huay-Pix, laguna Milagros.

INTRODUCCIÓN

Las lagunas son cuerpos de agua con aparente similitud con los lagos; su existencia puede corresponder a cualquier origen, drenaje y dimensiones. Permanecen relativamente estancados y son un tanto inestables, con variaciones en el nivel de agua; pueden ser temporales o permanentes, dependiendo del régimen pluvial. Son depósitos con una profundidad media menor a los 8 metros y de forma cóncava. Esta profundidad tiende a provocar una turbiedad que origina una menor transparencia del agua – en comparación con un lago – la cual frecuentemente resulta de color pardo o por la presencia de materia orgánica, por el crecimiento de algas y por la presencia de sólidos suspendidos (Cervantes, 2007).

Uno de los métodos básicos para conocer el comportamiento de un ecosistema acuático es realizar estudios limnológicos basados en la morfología, morfometría y batimetría. Estos brindan una amplia información sobre las condiciones limnológicas de los sistemas lacustres, lo cual es de esencial valor a la hora de planificar los proyectos de investigación acuáticas. Desde el punto de vista geográfico y geológico, la morfología de las lagunas se refiere al estudio de las formas de las lagunas y sus elementos, mientras que la morfometría estudia la cuantificación y medida de esas formas y elementos (Håkanson, 1981 en Ruíz-Sevilla, 2002). La morfología de un cuerpo de agua está relacionada principalmente con su origen, historia y con las características geológicas de su cubeta y cuenca. La morfometría de un cuerpo de agua tiene un importante efecto en la mayoría de los parámetros físicos, químicos y biológicos que en conjunto determinan el metabolismo de un lago o una laguna. Por lo que cobra mayor importancia su estudio, ya que en el trópico las variaciones climáticas son menos acentuados que en las otras regiones, lo que señala una mayor influencia de las parámetros morfométricas sobre las condiciones limnológicas de los cuerpos de agua tropicales (Montoya-Moreno, 2008).

Los parámetros morfométricos son de gran ayuda para calcular la forma y las dimensiones de un cuerpo de agua. La importancia del estudio de la morfometría reside principalmente en que la forma del cuerpo de agua es uno de los determinantes junto con el clima y el tipo de suelos de su cuenca de drenaje, de su productividad biológica (Fornerón *et al.*, 2010).

El estudio batimétrico forma parte de la morfometría y sirve como el principal método para describir las características físicas de un cuerpo de agua. Los mapas batimétricos son similares a mapas topográficos, en que nos proporciona detalles sobre el terreno de un paisaje. En el caso de un mapa batimétrico, el terreno que se describe es sumergido; suele representarse como una agrupación de curvas de nivel concéntricas, con la curva de nivel al extremo representando la línea costera de un cuerpo de agua en un momento dado. Las líneas en el mapa se obtienen mediante el registro de las profundidades en todo el cuerpo de agua y conectando los puntos de igual profundidad. Las curvas de nivel cercanas de unas a otras indican cambios rápidos en la profundidad del agua y las curvas que estén distantes indican profundidades que van cambiando gradualmente. Es importante señalar que la curva de nivel al extremo, así como el resto de la batimetría de un cuerpo de agua, está sujeto a cambios dependiendo de las precipitaciones y el resultado de los niveles del cuerpo de agua.

Estos tipos de estudios se justifican no solamente por su importancia económica, sino también por su alto significado ecológico. Estos funcionan como reguladores térmicos regionales, además de representar un registro histórico ambiental que permite reconstruir las modificaciones sucesivas que ha experimentado el medio geográfico durante los siglos de la historia social y los millones de años de evolución geológica (Ruíz-Sevilla, 2002).

Por lo tanto, la información morfométrica que se obtiene sobre las lagunas servirá como herramienta básica para la interpretación de procesos hidrológicos y ecológicos que se llevan a cabo en estos ambientes acuáticos. El análisis de la estructura y función de un cuerpo de agua frecuentemente requiere de un profundo conocimiento de la morfometría, particularmente de las características del vaso lacustre. Esto significa que los datos morfométricos son de fundamental importancia en proyectos limnológicos e hidrológicos (Ruíz-Sevilla, 2002).

Por consiguiente, es de fundamental importancia la realización de estudios morfológicos y batimétricos para poder comprender el comportamiento de los ecosistemas acuáticos así como las variaciones físicas y biológicas. Los estudios limnológicos es entonces parte fundamental en la toma de decisiones relacionadas con la gestión de los recursos hídricos para la preservación y manejo integral del ciclo hidrológico (Ruíz-Sevilla, 2002).

ANTECEDENTES

En México se han realizado trabajos limnológicos enfocados a los aspectos morfométricos, batimétricos, granulométricos, características físico-químicas y tróficas del agua, principalmente en la parte centro y norte del país (Arredondo-Figueroa *et al.*, 1983; Banderas-Tarabay *et al.*, 1991; Pérez-Rojas y Torres-Orozco, 1992; Pérez-Rojas *et al.*, 1994; Torres-Orozco *et al.*, 1994; Flores-Tena y Silva-Briano, 1995; De la Lanza-Espino y Lozano-Montes, 1999; Díaz-Vargas *et al.*, 2005; Ahumada-Sempoal y Ruiz-García, 2008). Sin embargo, hay muy pocos trabajos en la parte sur de México (Cervantes-Martínez, 2005); entre ellos podemos mencionar el de Herrera-Anzures, 2002 y Márquez-García *et al.*, 2006.

Con respecto a los estudios de la Península de Yucatán se cuentan con los de Flores-Nava *et al.* (1989); Cervantes-Martínez *et al.* (2002); Schmitter-Soto *et al.* (2002) y Cervantes-Martínez (2005); y específicamente para el sur de Quintana Roo se describen los siguientes trabajos de investigación:

Carrillo-Ruiz (2003) estudió la caracterización de la flora bacteriana y fúngica en la columna de agua del sistema lagunar Bacalar donde también determinó algunos parámetros fisicoquímicos.

Díaz-González (2004) realizó un estudio basado en la caracterización morfométrica de tres sistemas hidrológicos de la parte sur de Quintana Roo, (dos lagunas del poblado de Subtte. López y la desembocadura del río Hondo en la bahía de Chetumal); donde elaboró mapas batimétricos y calculó las magnitudes morfométricas, tales como: longitud máxima, anchura máxima y media, perímetro, profundidad máxima y media, área, volumen y desarrollo del litoral. En este trabajo se generaron los primeros estudios de los cuerpos de agua en esta parte del estado donde menciona que las dos lagunas, una con profundidad máxima de 15.42 m y la otra de 11.88 m, son relativamente más profundas que las lagunas costeras templadas del centro del país, que van de 1 a 7 m en promedio.

Maas-Vargas (2009) analizó las características físico-químicas de la laguna de Bacalar; observando un deterioro de la calidad del agua por la contaminación y el descuido de la gente por el escaso conocimiento básico sobre la laguna para su conservación y aprovechamiento. Debido a la escasa información de las lagunas del sur de Quintana Roo, fue importante mencionar los anteriores trabajos.

ÁREA DE ESTUDIO

Laguna Milagros.

La laguna Milagros es un cuerpo de agua dulce que se encuentra al sur del poblado Huay-Pix (Fig. 1) quien tiene una población total de 1649 habitantes (INEGI, 2010), situado en el municipio Othón P. Blanco en el extremo sur del estado de Quintana Roo, a unos 15 kilómetros oeste de la ciudad de Chetumal y se encuentra en las coordenadas geográficas latitud 18° 31' 04" N y longitud 88° 25' 34" W a una altura de 1 m sobre el nivel del mar. Su principal vía de comunicación es la Carretera Federal 186 que cruza junto a la población; la zona urbana se encuentra asentada entre dicha carretera y la orilla de la laguna Milagros. La Carretera Federal 186 la comunica hacia el este con Chetumal, a unos 10 km al noroeste después de enlazar con la Carretera Federal 307 se encuentra Bacalar; además, la laguna Milagros se localiza a unos 10 km al norte del Río Hondo que marca la frontera entre México y Belice.

Según la herramienta en línea de *Mapa Digital de México (5.0)* del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, muestra que la laguna Milagros esta clasificado como un cuerpo de agua perenne, lo cual significa que el agua de la laguna permanece todo el año. La Laguna Milagros forma un gran sistema lagunar junto a la Laguna de Bacalar y al Río Hondo, que se conectan a través de arroyos (Anónimo, 2011).

El poblado Huay-Pix ocupa una sección de la orilla norte. Las costas del sur de la laguna Milagros son en gran parte selva intacta con una abundancia de aves.

En la laguna se practican deportes acuáticos como la natación y el kayak. La principal actividad de la población es el turismo, por la cual existen múltiples restaurantes dedicados principalmente a los mariscos, así como servicios turísticos y paseos por la laguna (Anónimo, 2011).

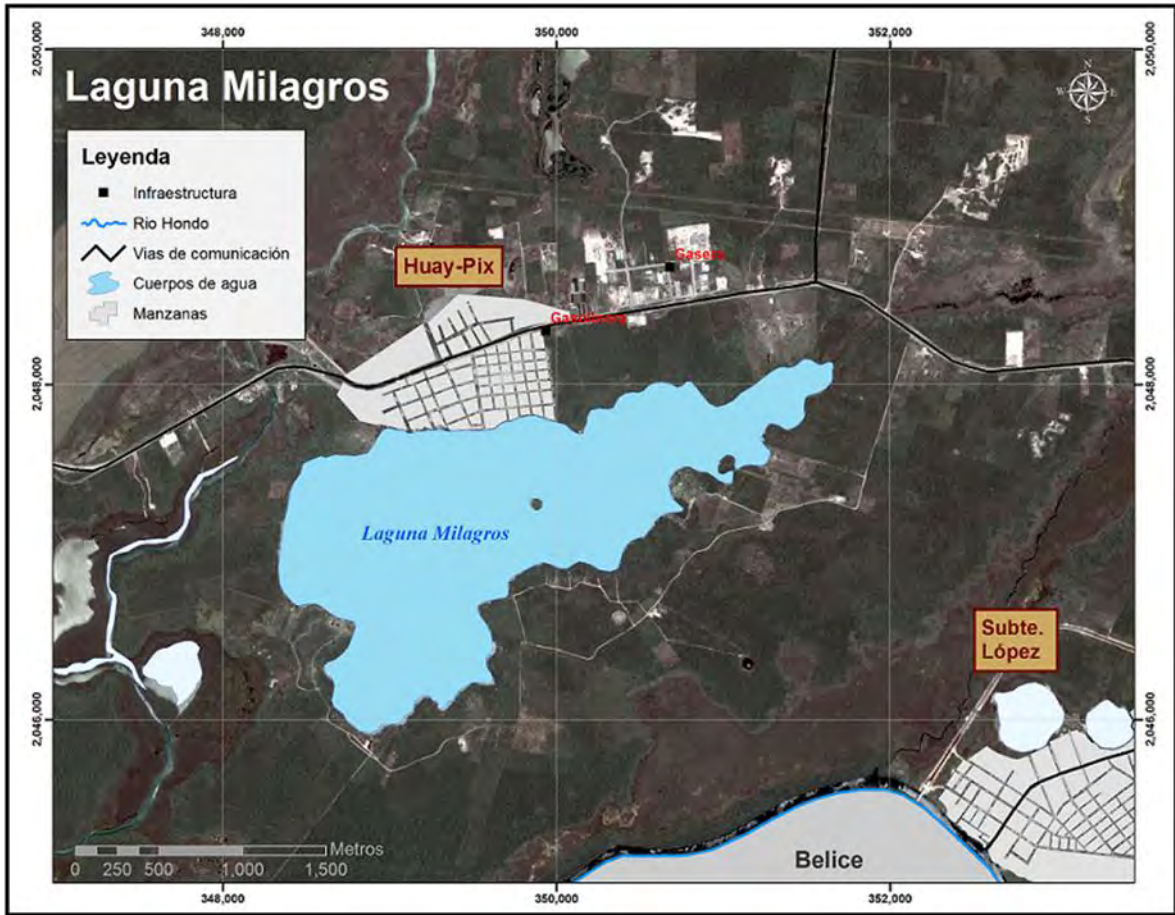


Fig. 1. Mapa de la ubicación de la laguna Milagros (elaborado por G.D. López-Montejo).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Objetivo General

- Caracterizar el comportamiento limnológico y morfométrico de la laguna Milagros.

Objetivos Específicos

- Analizar el comportamiento de la laguna Milagros por medio de parámetros físico-químicos (transparencia, temperatura del agua, pH, oxígeno disuelto y conductividad) y nutrimentos (amonio, nitritos y nitratos).
- Clasificar el tipo de sedimento de la laguna Milagros.
- Realizar la batimetría de la laguna Milagros.
- Determinar la morfología y las características morfométricas: longitud máxima, ancho máximo, área total, perímetro o longitud de la línea de costa, área superficial, ancho medio, índice de desarrollo de la línea de costa, profundidad máxima, profundidad media, profundidad relativa, volumen e índice de desarrollo del volumen.

Preguntas de Investigación

- ¿Cuál es el comportamiento limnológico (físico-químico) de la laguna Milagros?
- ¿Qué tipo de sedimento (arcillas, arenas, gravas) tiene la laguna Milagros?
- ¿Qué valores morfológicos y morfométricos tiene la laguna Milagros?

Justificación

La laguna Milagros forma parte del sistema lagunar de Bacalar. En el Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial de la Región de Laguna Bacalar, Quintana Roo, México, donde se incluye a la laguna Milagros, se establece que la laguna tiene como política ambiental la de “protección”, lo cual significa que tiene medidas para mejorar el ambiente y controlar su deterioro, promueve la permanencia de ecosistemas nativos que por sus atributos de biodiversidad, extensión, particularidad o servicios ambientales merezcan ser preservados, y en su caso, puede llegar a estar incluido en los Sistemas de Áreas Naturales Protegidas en el ámbito federal, estatal o municipal (Periódico Oficial del Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2005). Sin embargo, existen muy pocos estudios limnológicos en la laguna, y por lo tanto se requiere conocer tanto en su morfología, morfometría, granulometría y aspectos de nutrientes que permitan establecer una línea base para el uso, protección y conservación de la laguna Milagros.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo de campo se realizó durante la época de secas (finales de marzo – inicio de junio, 2012). Primero se midieron los parámetros físico-químicos, se obtuvieron las muestras de agua para determinar los nutrimentos, sedimentos para la granulometría, y posteriormente se determinó la morfometría y batimetría.

Parámetros Físico-químicos

El comportamiento de la laguna Milagros se evaluó mediante la medición de parámetros físico-químicos como son: transparencia (m), temperatura del agua (°C), pH, oxígeno disuelto (mg/l) y conductividad (mS/cm). Estos análisis se midieron en nueve sitios de muestreo que fueron geoposicionados con el GPS de una ecosonda digital Garmin GPSMAP 421s (Anexo 5) (Fig. 2, Tabla 1). Los sitios de muestreo se definieron con base a: 1) influencia de los arroyos de entrada o salida, 2) zona urbana y 3) zona de vegetación.

Las muestras se tomaron en la superficie y fondo de la columna de agua con una botella Van Dorn de 1 litro de capacidad (Anexo 2). La transparencia se determinó con un disco de Secchi, la temperatura del agua y el pH fueron medidos en forma simultánea con un medidor de pH (con compensación de temperatura) Hanna HI-991003, el oxígeno disuelto con un oxímetro Hanna HI-9142 y la conductividad con un conductímetro Hanna HI-9635.

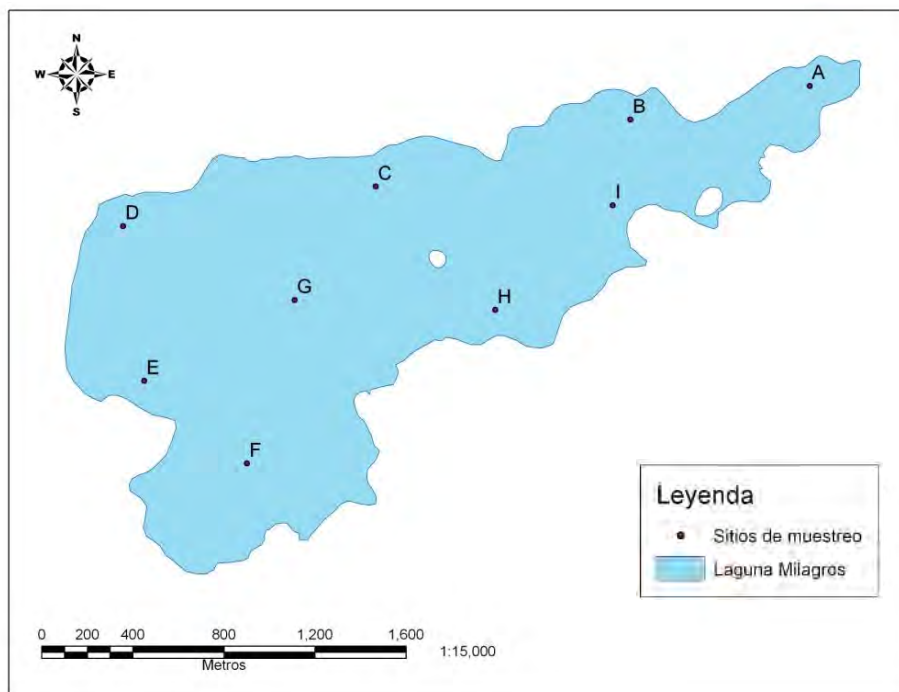


Fig. 2. Localización de los sitios de muestreo de la laguna Milagros.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de las estaciones de muestreo de la laguna Milagros, Huay-Pix, Q. Roo.

Estación	Latitud Norte	Longitud Oeste
A	18°31'03.0"	88°24'26.3"
B	18°30'58.2"	88°24'51.8"
C	18°30'48.7"	88°25'28.0"
D	18°30'43.1"	88°26'03.9"
E	18°30'21.1"	88°26'00.9"
F	18°30'09.4"	88°25'46.3"
G	18°30'32.6"	88°25'39.5"
H	18°30'31.2"	88°25'11.0"
I	18°30'45.8"	88°26'54.8"

Nutrientos

Los nutrientes (mg/l): amonio (NH_4^+), nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-), fueron determinados mediante los métodos de Nessler, de diazotización y de reducción de cadmio respectivamente (APHA, 1995), utilizando kits de reactivos comerciales Hach y un espectrofotómetro portátil Hach DR/2010 (Anexo 3).

Granulometría

La clasificación de las partículas del sedimento se determinó con el análisis granulométrico. Este análisis permitió determinar las proporciones relativas de los diferentes tamaños de granos presentes en una masa de suelo dada. Se obtuvo el sedimento con un nucleador, posteriormente se expuso al sol y se secó a temperatura ambiente; el sedimento compactado se desmoronó con una mano de mortero en un mortero. Se pesó 50 g de la muestra seca y molida en una balanza de precisión, posteriormente se colocó en un tren de tamices; las mallas de los tamices de diámetros mayores arriba y los de diámetros inferiores abajo (diámetro de los tamices: 1mm, 0.710mm, 0.500mm, 0.355mm, 0.150mm, 0.106mm, 0.075mm). Se colocó el tren de tamices en el tamizador (rotor) tipo RX-29 (Anexo 4) y éste se puso a trabajar durante 15 minutos. Después de este tiempo se quitó el juego de tamices y se procedió a pesar de uno en uno el sedimento retenido en cada tamiz utilizando una brocha como apoyo para limpiar las mallas de los tamices y se anotaron las cantidades. Posteriormente, los datos obtenidos se procesaron con el programa ANGS (*Análisis Granulométrico de Sedimentos*) para calcular el tipo de sedimento (Vargas-Hernández, 1991).

Morfometría y Batimetría

La morfometría se realizó mediante el análisis de los siguientes parámetros: longitud máxima ($L_{m\acute{a}x}$, en km), ancho máximo (B, en km), área total (a, en km^2), perímetro o longitud de la línea de costa (l_o , en km), área superficial (A, en km^2), ancho medio (B_m , en km), índice de desarrollo de la línea de costa (F, adimensional), profundidad máxima ($D_{m\acute{a}x}$, en m), profundidad media (D_m , en m), profundidad relativa (D_r , en %), volumen (V, en m^3) e índice de desarrollo del volumen (V_d , adimensional). Las ecuaciones y simbología son de acuerdo a Håkanson (1981) en Roldán-Pérez y Ramírez-Restrepo (2008), y se mencionan a continuación:

La **longitud máxima** y el **ancho máximo** se determinaron usando la herramienta *Google Earth (6.1.0.5001)* con la función “regla” para medir la distancia entre dos puntos. La longitud máxima se determinó mediante la medición de la distancia entre los dos puntos más separados de litorales opuestos sin cruzarse ninguna porción de terreno; y el ancho máximo se midió en los dos puntos opuestos del litoral y en un ángulo aproximadamente recto a la longitud máxima.

El **área total** es la superficie de la laguna, incluyendo todas las islas y demás promontorios limitados por el perímetro. El **área superficial** es la superficie inundada de la laguna que es el área total menos el área de todas las islas y rocas dentro de los límites de la línea costera. El **perímetro o longitud de la línea de costa** es la medida del contorno de la laguna. Estos se determinaron con la herramienta en línea *Mapa Digital de México* (5.0) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, mediante la función “medir” que es para distancias y áreas.

El **ancho medio** es el promedio de la anchura de la laguna y se definió mediante la razón área superficial entre la longitud máxima:

$$B_m = A / L_{\text{máx.}}$$

Para la determinación del **índice de desarrollo de la línea de costa**, se utilizó la relación entre el perímetro y la circunferencia de un círculo que presenta el área superficial. Este dato es adimensional y proporciona una medida de la irregularidad del perímetro; si F es igual a 1 significa que la cuenca de la laguna es perfectamente circular, y si F es mayor a 1 significa que la cuenca es irregular. Su fórmula es:

$$F = (l_o / 2(\pi A))^{0.5}.$$

En cuanto a la batimetría, se inició con la realización del levantamiento batimétrico de la laguna Milagros con la elaboración de un mapa de 86 transectos mediante la determinación de los puntos georeferenciados en el perímetro de la laguna (Cruz-Angeles, 2000), con el programa *ArcGIS 10*, específicamente *ArcMap*, que nos sirvió como guía durante la navegación. Los puntos georeferenciados o las coordenadas fueron ingresados en la ecosonda digital antes del inicio del recorrido y posteriormente fueron posicionados geográficamente en la laguna con el GPS (sistema de posicionamiento global) integrado en la ecosonda. Con el apoyo de una lancha y el mapa (Fig. 3), se tomaron las mediciones de las profundidades utilizando la ecosonda digital *GPSMAP 421s* (Anexo 5). Para tener una mayor consistencia, el criterio que se utilizó para estimar el recorrido de la embarcación es viajar a aproximadamente 5 nudos y tomar un punto (grabar datos de la profundidad con la ecosonda) cada 20 segundos. Después de recorrer toda la laguna, se transfirieron los datos obtenidos de la ecosonda a la computadora para crear el mapa batimétrico utilizando el programa *ArcMap*. El mapa batimétrico fue generado utilizando el

método de interpolación: 'Topo to Raster', que es una herramienta de interpolación diseñada específicamente para crear modelos digitales de elevación hidrológicamente correctos (Alcocer y Escobar, 1993).

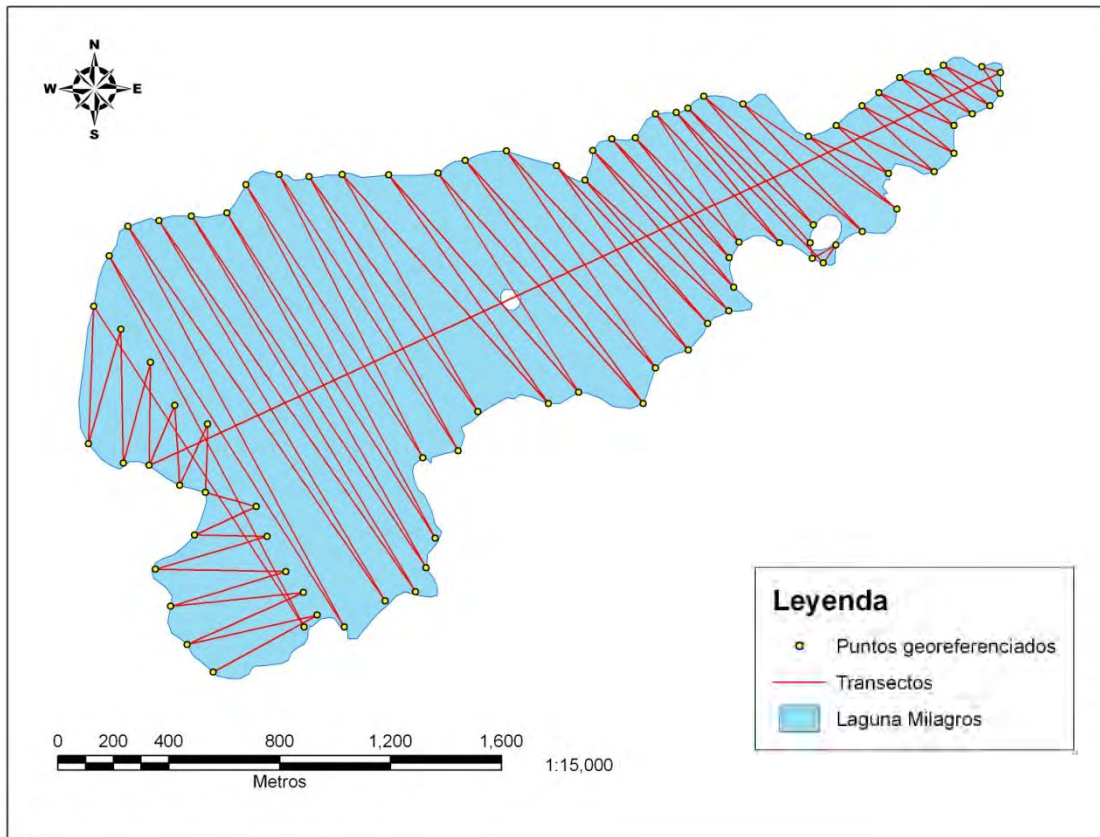


Fig. 3. Transectos para la realización del levantamiento batimétrico

La **profundidad máxima**, por definición constituye la parte más profundo de la laguna, se obtuvo después de realizar la batimetría de la laguna Milagros tomando el valor más alto de las profundidades.

La **profundidad media** es el promedio de las profundidades obteniéndose mediante la relación entre el volumen del agua y el área total:

$$D_m = V/a.$$

La **profundidad relativa** se obtuvo por medio del cociente entre la profundidad máxima y el diámetro medio de la laguna:

$$D_r = [D_{m\acute{a}x} 100] / [2(a/\pi)^{0.5}] = 88.6D_{m\acute{a}x} / (a)^{0.5}$$

El **volumen** es la capacidad contenida en una cubeta lacustre, se determinó con el conocimiento de la batimetría y se calculó utilizando la herramienta “cut fill” del programa *ArcMap*, la cual calcula el cambio del volumen entre dos superficies. Se tomó como base la superficie del suelo, con una altura de 0 metros asignada de manera arbitraria y comparando con el modelo batimétrico de la laguna se determinó el volumen.

El **índice de desarrollo del volumen** compara el volumen de la laguna con el volumen de un cono invertido de base y altura equivalentes al área superficial y a la profundidad máxima de la laguna; y se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$V_d = V_{\text{real}} / V_{\text{cono hipotético}} = 3V / a * D_{\text{máx}} = 3D_m / D_{\text{máx}}.$$

Cuando V_d es igual a 1, se trata de un cono igual al teórico (cono invertido); cuando es menor que 1, entonces la laguna es de tipo convexo y tiene forma similar a la letra V; si V_d es mayor que 1 es de tipo cóncavo y tiene forma de U (Fig. 4.), por lo general éstas formas son las típicas, o en otras palabras, es la forma ideal de un cuerpo de agua que corresponde a la de un senoide elíptico (Herrera-Anzures, 2002; Roldán-Pérez y Ramírez-Restrepo, 2008).

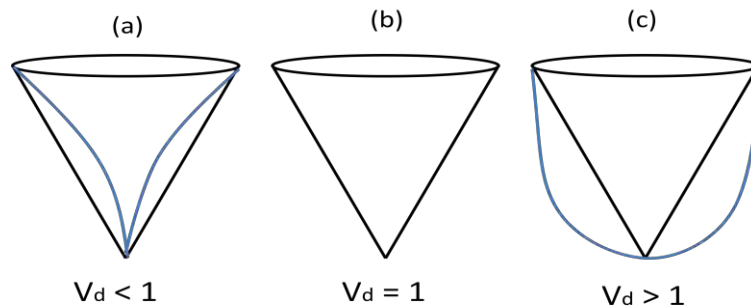


Fig. 4. Cambios en los valores del índice de desarrollo del volumen (V_d) como consecuencia de las variaciones de la morfometría de la laguna. (a) como tipo convexo; (b) como invertido y (c) como tipo cóncavo.

Fuente: Roldán-Pérez y Ramírez-Restrepo (2008).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parámetros Físico-químicos en la laguna Milagros

Profundidad y Transparencia.

Se observaron los valores obtenidos sobre la profundidad en las nueve estaciones de la laguna Milagros registrándose la mayor profundidad en la estación G con 3.4 m y las menores en las estaciones A y F, ambas con 1.3 m. El valor máximo de transparencia se encontró en la estación C de 1.28 m (con 1.6 m de profundidad) mientras que el valor mínimo en la estación F de 0.80 m (con 1.3 m de profundidad) (Fig. 5).

De manera general, los valores de transparencia presentaron un promedio de 1.07 m (Tabla 2).

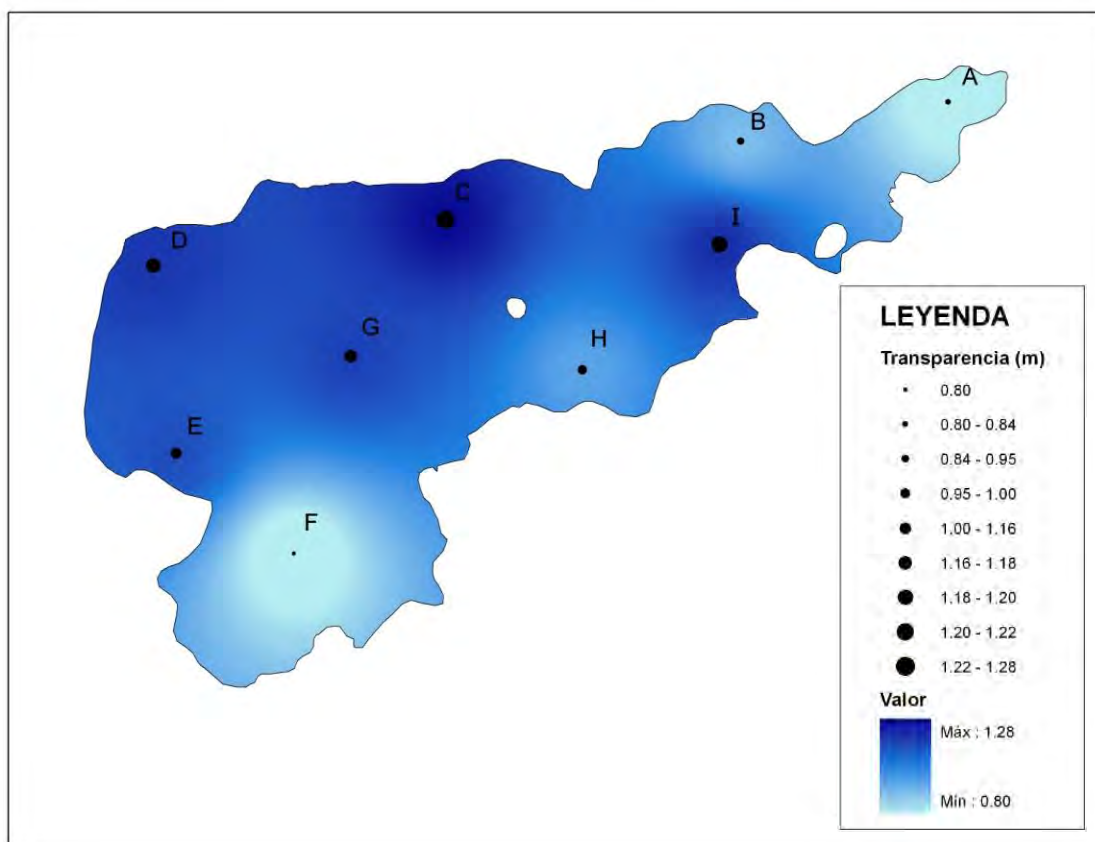


Fig. 5. Transparencia de la laguna Milagros en las estaciones de muestreo

Tabla 2. Promedio general de los parámetros físico-químicos y nutrientes

ESTACIÓN	Prof. (m)	PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS										NUTRIMENTOS					
		Transp. (m)	Temp. (°C)		pH		O. D. (mg/l)		Cond. (mS/cm)		Amonio (mg/l)		Nitritos (mg/l)		Nitratos (mg/l)		
			S	F	S	F	S	F	S	F	S	F	S	F	S	F	
A	1.3	0.84	27.9	28.2	6.01	6.38	5.8	5.5	2.71	3.45	1.87	2.66	0.008	0.009	1.2	1.1	
B	2	0.95	28.4	28.4	7.19	6.11	6.5	6.3	2.63	2.69	2.09	2.91	0.006	0.002	0.9	0.5	
C	1.6	1.28	29.2	28.8	7.61	7.61	7	6.4	3.32	1.61	2.37	2.27	0.007	n/d	1.2	1.3	
D	1.6	1.20	29.2	28.8	7.79	7.86	7.7	6.4	3.53	3.39	2.40	3.33	0.001	0	1.6	0.7	
E	1.6	1.16	29.5	28.8	7.75	7.85	7.7	5.7	1.65	3.53	2.24	2.33	0.006	0.006	1.2	0.8	
F	1.3	0.80	29.4	30	7.7	7.75	7.5	6.1	1.67	3.33	2.88	1.37	n/d	0.006	1.3	0.8	
G	3.4	1.18	28.9	28.8	6.85	7.49	7.1	6.9	3.51	3.47	2.81	3.05	0.001	0.002	1.5	0.7	
H	1.5	1.00	29.2	29.1	6.61	6.57	7.01	6.05	2.69	2.69	1.27	2.87	0.003	n/d	1.3	1.2	
I	1.8	1.22	28.8	29.2	7.05	6.83	8.03	7.2	2.42	2.68	2.54	2.2	0.002	n/d	1.5	1.2	
PROMEDIO	1.8	1.07	28.9	28.9	7.17	7.16	7.15	6.28	2.68	2.98	2.27	2.55	0.004	0.003	1.3	0.9	

Prof. – Profundidad
 Transp. – Transparencia
 Temp. – Temperatura
 O. D. – Oxígeno disuelto
 Cond. – Conductividad
 S – Superficie
 F – Fondo
 n/d – no detectable

Una de las importancias de la medición de la transparencia, es que es un parámetro indirecto para medir la productividad biológica de un cuerpo de agua. En general, la laguna Milagros es un sistema con aguas turbias y este comportamiento puede estar relacionado con las sustancias disueltas orgánicas; compuestos de plantas terrestres y acuáticas; fitoplancton; sólidos suspendidos como arena, arcilla o partículas orgánicas disueltas del fondo o lavado desde la tierra circundante o traídos por el viento y lluvia; geología y fisiografía de la cuenca, los cuales influyen sobre las características del cuerpo de agua; así como las variaciones estacionales (temperatura, viento y precipitación) (Florida LAKEWATCH, 2001).

Temperatura.

La temperatura de la superficie de la columna de agua osciló entre 27.9 y 29.5 °C (Fig. 6) y en el fondo entre 28.2 y 30 °C (Fig. 7). Se observó la temperatura del agua más alta de la superficie en la estación E y la más baja en la estación A. Para el fondo, se observó el valor máximo en la estación F y el valor mínimo en la estación A. Las temperaturas más bajas se presentaron en la estación A (Fig. 8).

El promedio general de la temperatura del agua tanto en la superficie como en el fondo fue de 28.9°C (Tabla 2).

Carrillo-Ruiz (2003) mencionó que el sistema lagunar Bacalar mantiene una oscilación termal donde la mínima es de 27 °C y la máxima de 31.5 °C, teniendo una temperatura de 30°C en la mayor parte del sistema (final de la época de secas y principio de lluvias). Esto nos demuestra que el comportamiento de la temperatura de la laguna Milagros es similar a lo reportado para lagunas de la región.

Los factores principales que afectan la temperatura del agua es la energía del sol y la temperatura del aire. Otras influencias son flujos de entradas y salidas de agua, forma y profundidad de la cuenca (morfometría de la laguna), viento, olas, y hasta el color del agua. Debido a que la laguna Milagros es somera y de menor volumen, la influencia de la temperatura del aire es mayor (Florida LAKEWATCH, 2004).

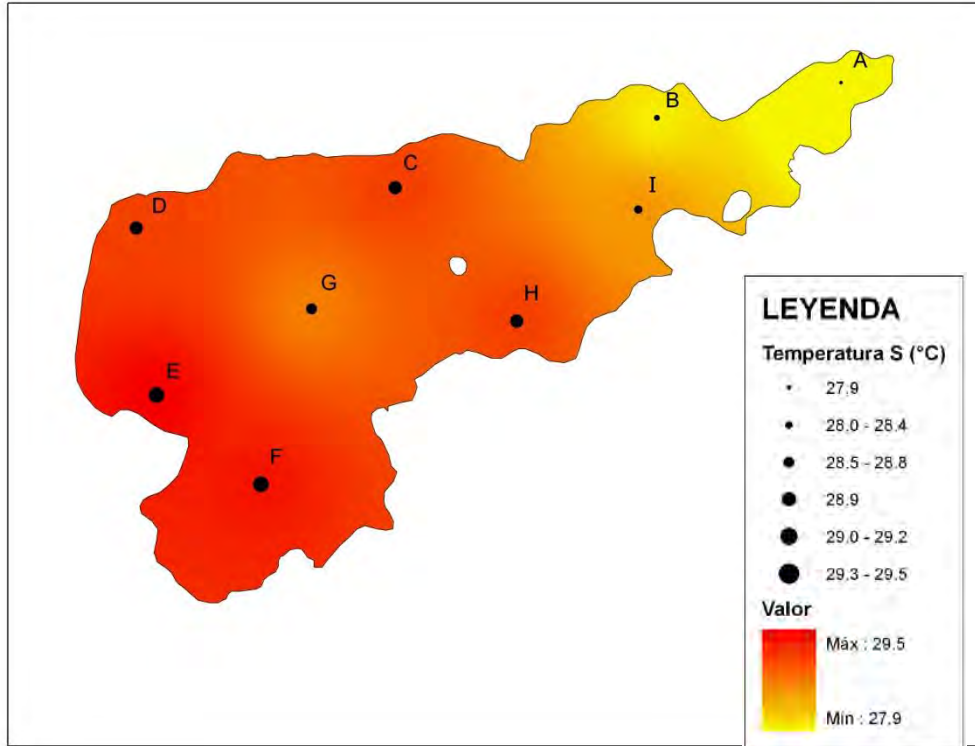


Fig. 6. Distribución de la temperatura del agua en la superficie (S) por estación de muestreo

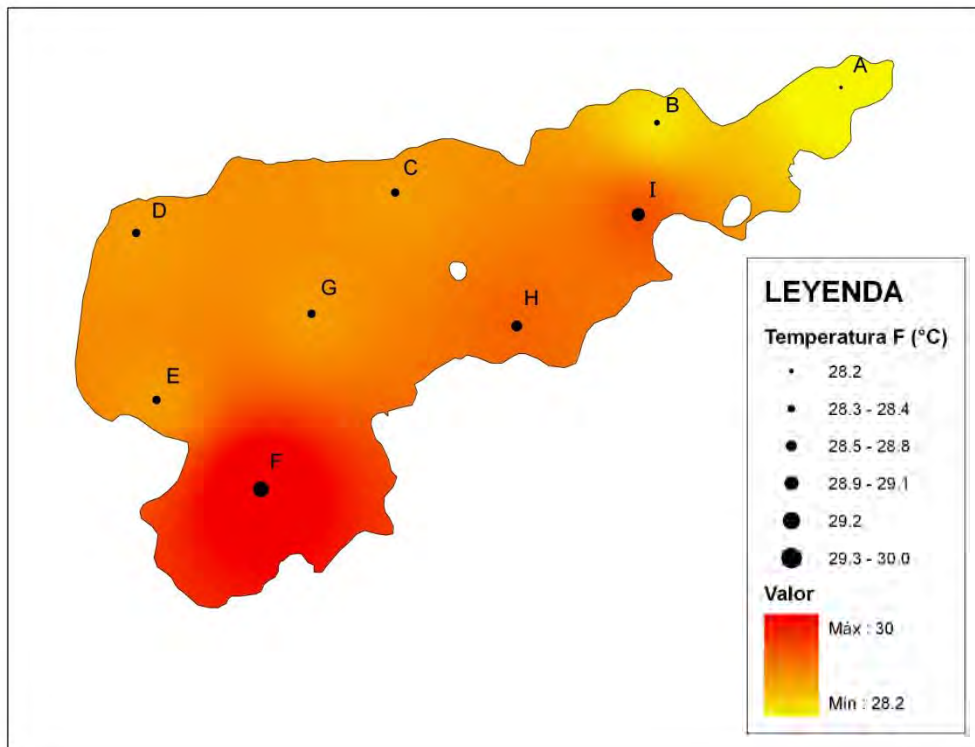


Fig. 7. Distribución de la temperatura del agua en el fondo (F) por estación de muestreo

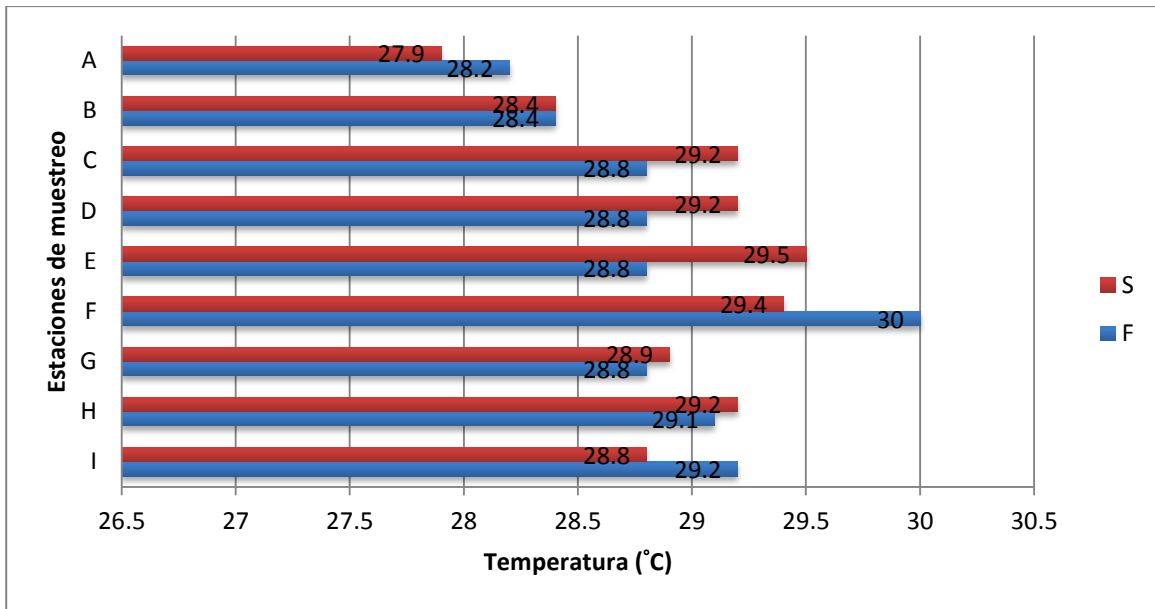


Fig. 8. Variación de la temperatura del agua en la superficie (S) y fondo (F) por estación de muestreo

En la mayoría de las estaciones, las temperaturas del agua en la superficie fueron más altas que las del fondo, esto es debido a que las aguas superficiales son calentadas por la luz solar y como resultado generando agua tibia y menos densa que el agua más fría y densa del fondo. Algunas estaciones presentaron menos temperatura en la superficie que en el fondo, esto puede ser debido a la someridad de la laguna, que pudo ser influenciado fácilmente por el viento. Aunado a esto, los datos obtenidos también pudieron ser influenciados por la radiación y la intensidad del viento en las horas muestreadas de cada estación, ya que en horas más tempranas, la temperatura del agua fue ligeramente menor.

pH (potencial de hidrógeno).

El valor de pH para la superficie reportó un rango de 6.01 a 7.79 (Fig. 9); el valor más bajo se encontró en la estación A y el más elevado en la estación D. Para el fondo, se reportó un rango de 6.11 a 7.86 (Fig. 10) con el valor más bajo en la estación B y el más elevado en la estación D.

De manera general, el valor promedio de pH del agua en la superficie y fondo fue de 7.17 y 7.16 respectivamente (Tabla 2).

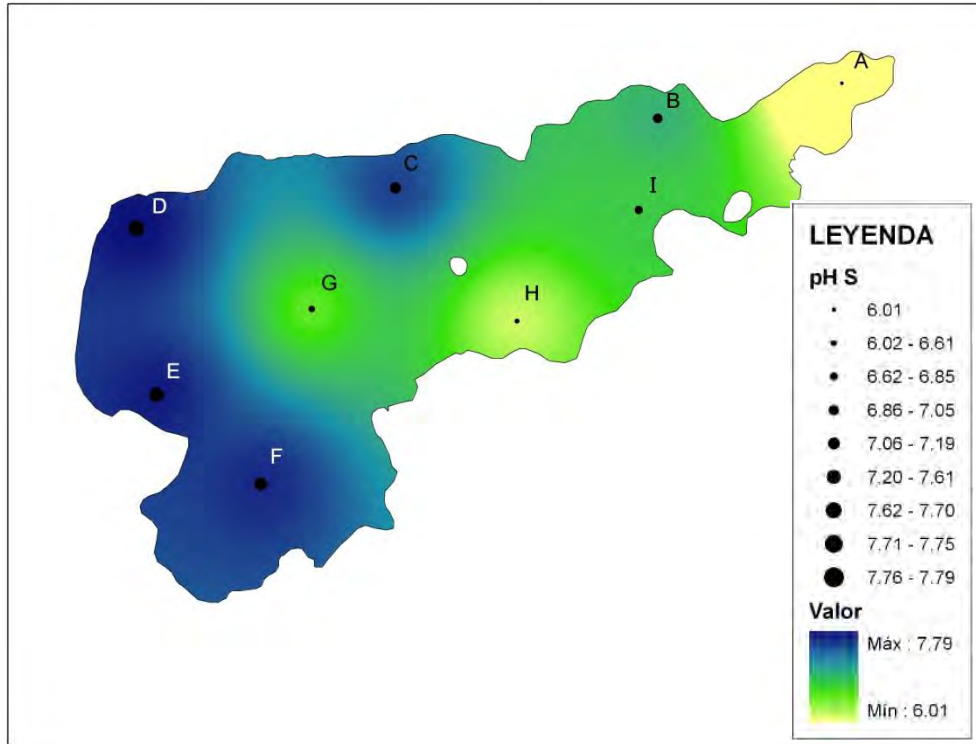


Fig. 9. Comportamiento del pH del agua en la superficie (S) por estación de muestreo

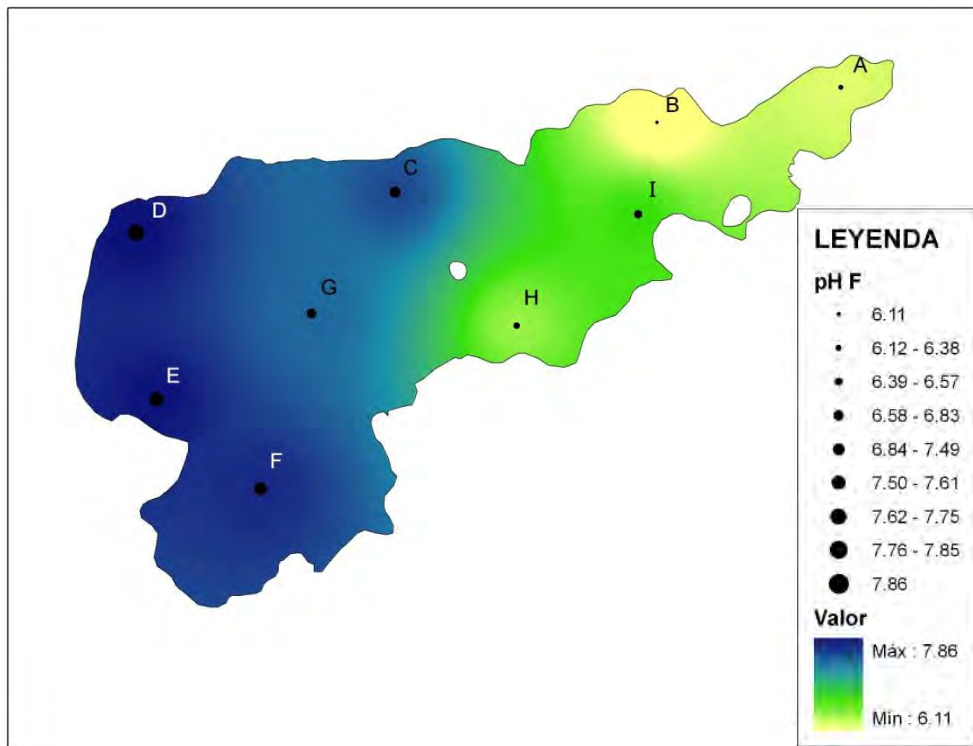


Fig. 10. Comportamiento del pH del agua en el fondo (F) por estación de muestreo

Los valores de pH mostraron poca variación en las profundidades (Fig.11). Se observó que en la estación D se encontraron los valores máximos de pH, seguido por la estación E, F y luego C. De manera general el pH del agua fue neutro con tendencia hacia la acidez.

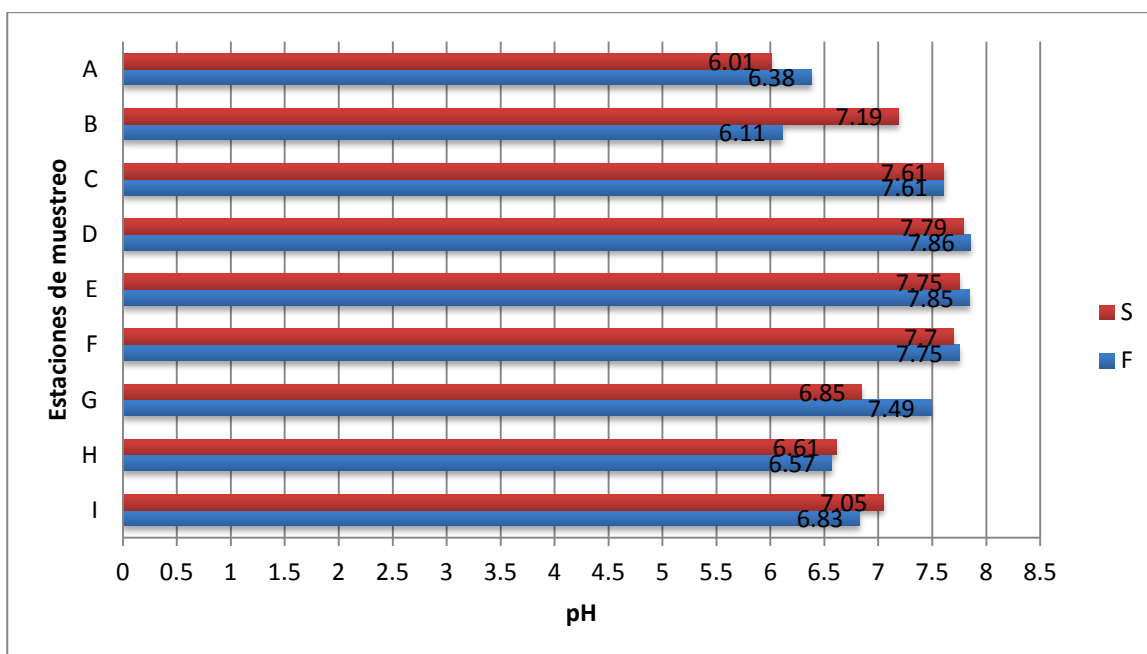


Fig. 11. Variación del pH del agua en la superficie (S) y fondo (F) por estación de muestreo

El pH se puede alejar del valor promedio indicado por efecto de la actividad fotosintética, la respiración celular y el efecto de descargas de origen antropogénico. En términos generales, el pH de un cuerpo de agua puede variar a lo largo de un amplio rango de valores, dependiendo de factores intrínsecos y extrínsecos al ambiente acuático. Los factores intrínsecos son: la capacidad amortiguadora del sistema de alcalinidad carbonato-bicarbonato; la estratificación y mezcla del sistema acuático; la evaporación; la intensidad de procesos biológicos tales como fotosíntesis, respiración y actividades de descomposición de materia orgánica; y la interacción de los factores anteriormente mencionados con el sistema de alcalinidad. Mientras que los factores extrínsecos se componen de: la composición de suelos adyacentes, depósitos superficiales y lecho rocoso; las fuentes de contaminación como del drenaje, ácido de minas y precipitación ácida; la presión parcial de CO_2 en la atmósfera; y la temperatura (Fuentes y Massol-Deyá, 2002).

Los valores de pH son utilizados para observar la acidez y alcalinidad del agua. Para pH menores a 7 (hacia la acidez), se debe a la descomposición de materia orgánica y liberación de ácidos causados por el vertido o arrastre de sustancias tóxicas de origen industrial o agrícola. Esto causa el aumento (proliferación, incremento, crecimiento) de bacterias que agotan el oxígeno (Vergara-Sánchez, 2007). Por lo tanto, en la laguna Milagros existe la posibilidad de que esté recibiendo descargas de sustancias tóxicas agrícolas. Por otro lado, la laguna Milagros registró pH mayores a 7 (hacia la alcalinidad), estos valores son típicos de cuerpos de agua de paisaje cárstico, con reserva alcalina alta y con el predominio de carbonatos y bicarbonatos como sales amortiguadoras (Cervantes-Martínez, 2005), por lo que la laguna se localiza en una región donde el sustrato es formado por roca caliza.

Oxígeno disuelto.

El valor máximo de oxígeno disuelto se presentó en la estación I (Fig. 12, 13) tanto en la superficie como en el fondo registrándose de 8.03 a 7.2 mg/l respectivamente. Así mismo, para el valor mínimo, se presentó en la estación A de 5.8 a 5.5 mg/l respectivamente (Fig. 14).

El promedio general del oxígeno disuelto en la superficie y fondo fue de 7.15 mg/l y 6.28 mg/l respectivamente (Tabla 2).

Los dos factores que limita la cantidad de oxígeno en un cuerpo de agua son la temperatura y la altitud. En general, la concentración de oxígeno en agua es inversamente proporcional con la temperatura y la altitud (Florida LAKEWATCH, 2004). Este fenómeno físico no se aplicó para todos los sitios porque en algunos se registraron mayor temperatura en la superficie y otros en el fondo, pero para todos los sitios se observaron mayor concentración de oxígeno disuelto en la superficie y menor en el fondo.

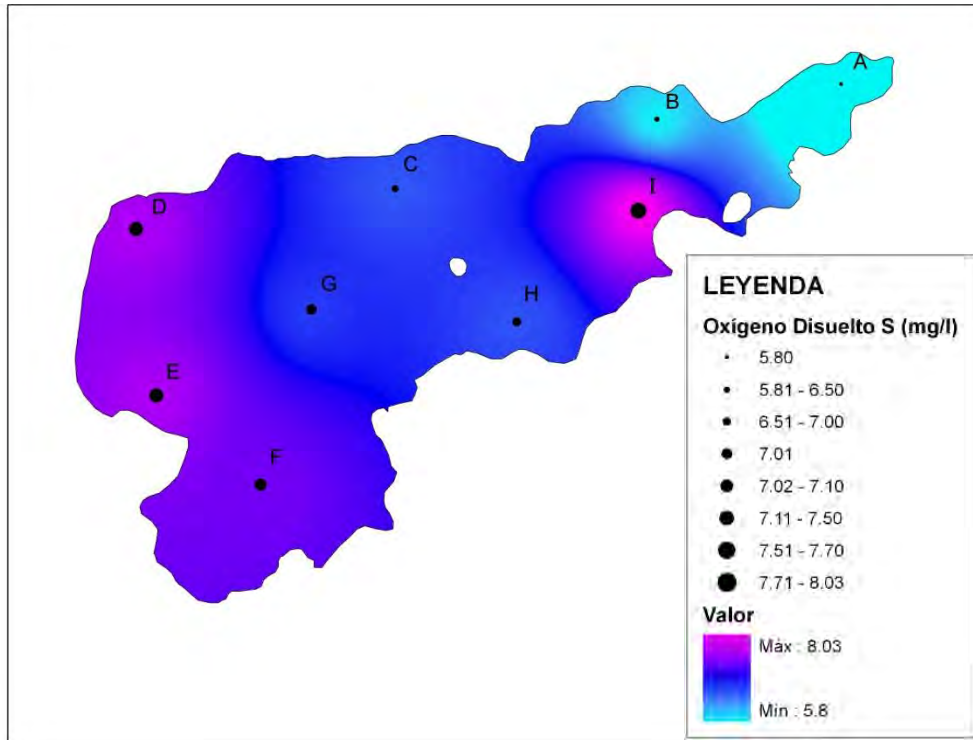


Fig. 12. Comportamiento del oxígeno disuelto del agua en la superficie (S) por estación de muestreo

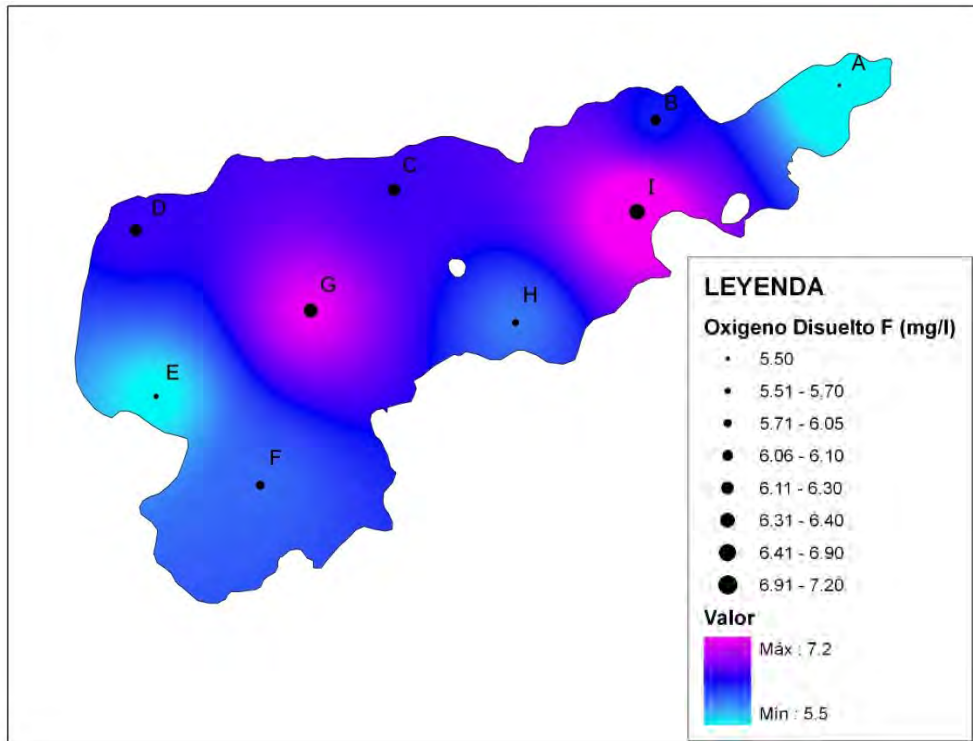


Fig. 13. Comportamiento del oxígeno disuelto del agua en el fondo (F) por estación de muestreo

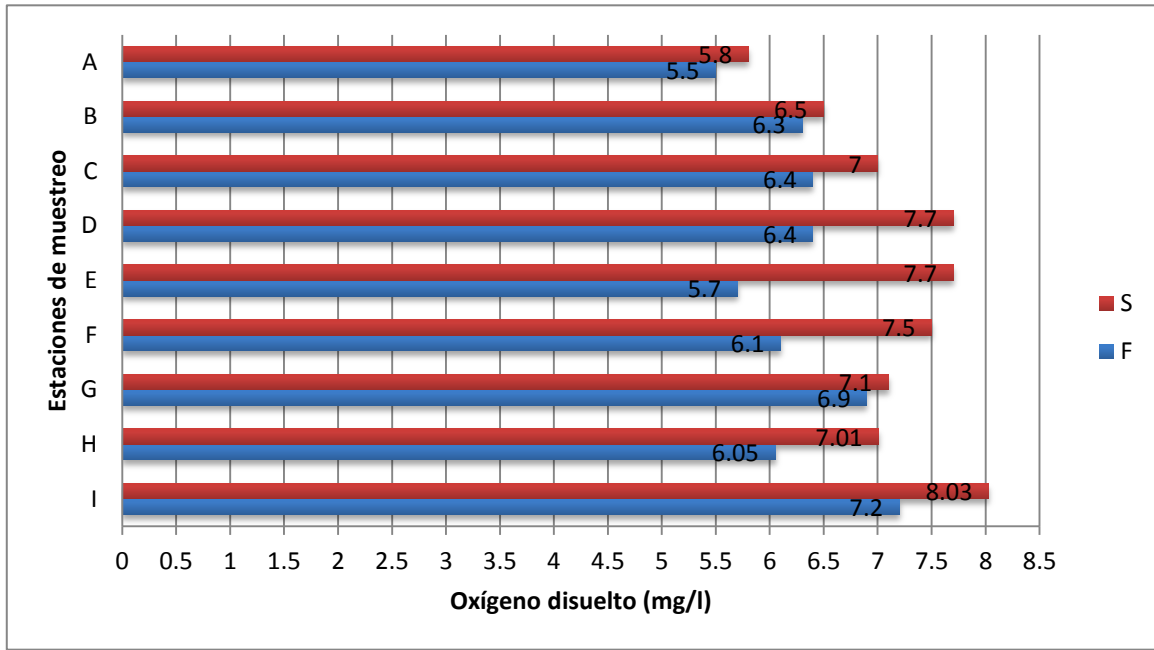


Fig. 14. Variación del oxígeno disuelto del agua en la superficie (S) y fondo (F) por estación de muestreo

Se observó que en todas las estaciones, el oxígeno disuelto en la superficie del agua fue mayor que en el fondo. Esto puede ser debido a que el agua de la superficie tiene mayor contacto con el viento lo cual crea olas o turbulencias y estas acciones aceleran la difusión del oxígeno creando más área superficial para que el oxígeno entre desde la atmósfera hacia la superficie del agua, así como también la generación de oxígeno por la actividad de organismos fotosintéticos (Fuentes y Massol-Deyá, 2002).

La laguna Milagros presentó aguas bien oxigenadas de acuerdo a los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001/89), para la protección de la vida acuática en agua dulce, el cual establece que el valor mínimo permitido es de 5 mg/l (Anónimo, 1989; INE - SEMARNAP, 2000), todos los sitios mostraron concentración de oxígeno más de 5 mg/l y en ningún caso se observaron sitios con anoxia o más bajos que el valor mínimo permitido.

Conductividad.

Los valores de la conductividad en la superficie oscilaron entre 1.65 y 3.55 mS/cm con el valor máximo registrado en la estación D y el valor mínimo en la estación E (Fig. 15). De modo semejante, la conductividad en el fondo osciló entre 1.61 y 3.53 mS/cm con el valor máximo registrado en la estación E y el valor mínimo en la estación C (Fig. 16). Los valores de la conductividad fueron menores en la superficie que en el fondo para cinco de los sitios (Fig. 17).

El promedio de la conductividad en la superficie y fondo fue de 2.68 y 2.98 mS/cm respectivamente (Tabla 2).

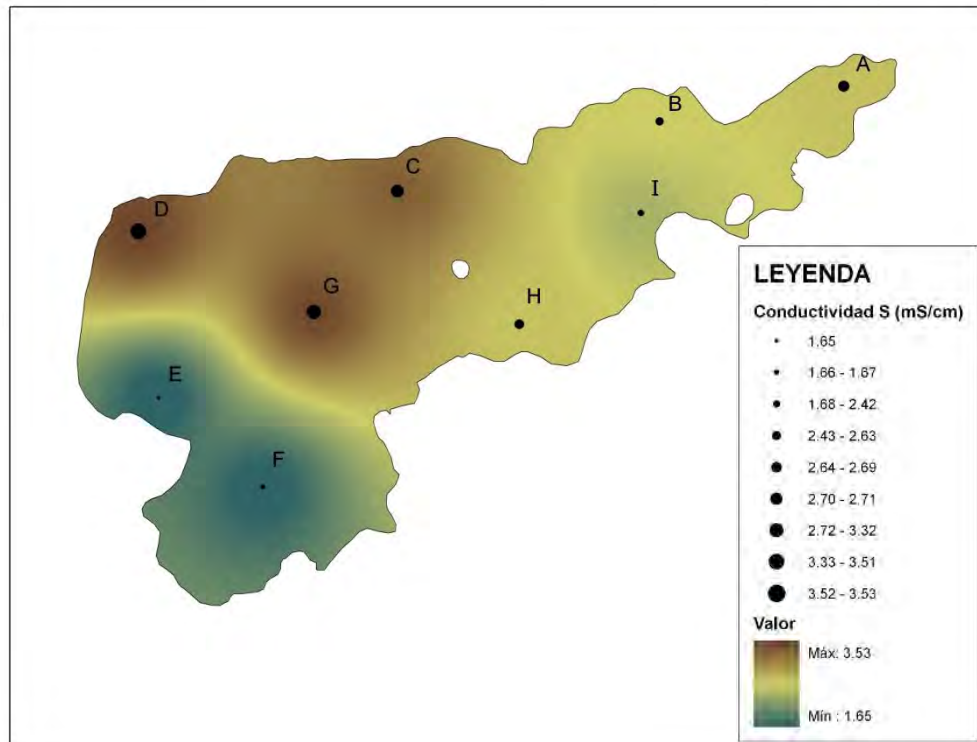


Fig. 15. Distribución de la conductividad del agua en la superficie (S) por estación de muestreo

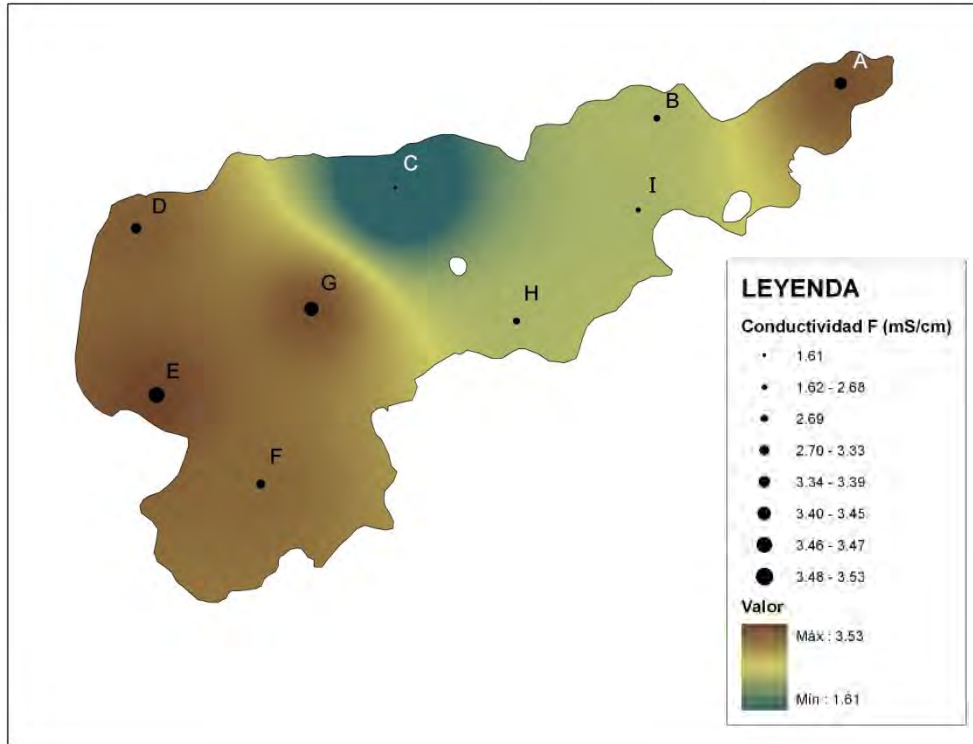


Fig. 16. Distribución de la conductividad del agua en el fondo (F) por estación de muestreo

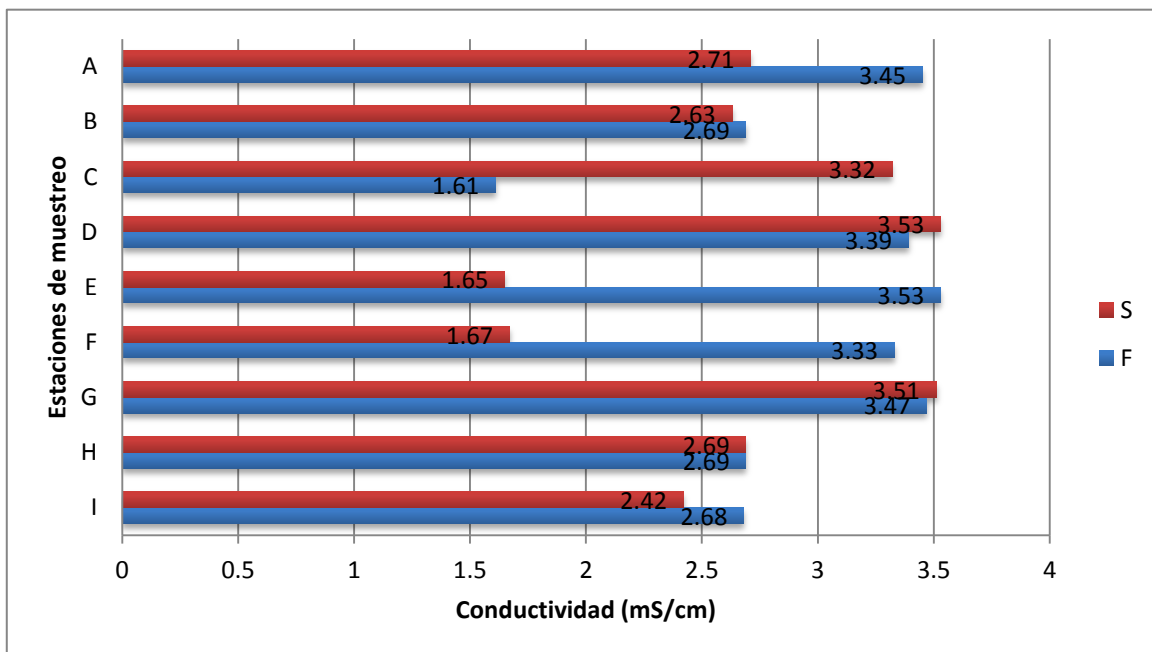


Fig. 17. Variación de la conductividad del agua en la superficie (S) y fondo (F) por estación de muestreo

La conductividad y salinidad son dos parámetros que están íntimamente relacionados, por lo tanto el comportamiento entre ellos es de manera similar (Cervantes-Martínez, 2005). La conductividad es el parámetro más representativo para determinar la intrusión salina, lo cual depende de la concentración de sodio (Na^+) y cloro (Cl). Unas causas que podrían influenciar el fenómeno físico de estos parámetros, son el aporte de agua con contenido salino del arroyo, agua dulce del agua subterránea, las descargas de aguas residuales municipales, y la precipitación; o las minerales provenientes del suelo y de las rocas, el rocío del mar, y la evaporación por la elevada temperatura (CWT, 2004). La laguna Milagros, por ser un cuerpo de agua perenne y somero, es probable que presenta procesos de evaporación y descomposición de materia orgánica en el fondo causando el incremento de la conductividad en el sistema.

Nutrientes

Los nutrientes analizados fueron amonio (NH_4^+), nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-); son tres de las formas inorgánicas disponibles en las que se puede encontrar al nitrógeno. El nitrógeno es en general el nutriente limitante en los ambientes acuáticos y por lo tanto es importante para el desarrollo de la flora y fauna acuática (Barrenechea-Martel, 2004).

Amonio.

El nivel más elevado de amonio en la superficie fue de 2.88 mg/l presentado en la estación F y el más bajo fue de 1.27 en la estación H (Fig. 18). El nivel más elevado en el fondo fue de 3.33 mg/l registrado en la estación D mientras el más bajo de 1.37 mg/l en la estación F (Fig. 19).

Los valores de amonio presentaron un promedio general de 2.27 mg/l en la superficie y 2.55 mg/l en el fondo (Tabla 2).

Las concentraciones de amonio presentaron mayores en el fondo que en la superficie para siete de las nueve estaciones (Fig. 20). Esto puede ser por la entrada de altas cantidades de materia orgánica; además, por los aportes de escorrentía terrestres y aguas subterráneas (efluentes domésticos) o por fertilizantes nitrogenados y excremento de

animales (Fuentes y Massol-Deyá, 2002). La presencia de amonio en el agua está íntimamente relacionado con descargas recientes de desagües, y en todas las estaciones presentaron concentraciones de más de 1.27 mg/l, y por ser mayor a 0.1 mg/l, podría considerarse en un indicador de contaminación por aguas residuales domésticas o industriales; ya que el amonio es el producto final de la reducción de las sustancias orgánicas e inorgánicas nitrogenadas y debe su origen a factores como: 1) nitrógeno atmosférico, por fijación química, 2) proteínas animales o vegetales, por putrefacción mediante acción bacteriana y 3) reducción de nitritos (Barrenechea-Martel, 2004).

En el caso de la calidad del agua para la protección de vida acuática, las normas internacionales (Recomendación Nacional Actual sobre Criterios de Calidad del Agua de los Estados Unidos de América y Directiva 78/659/CEE de la Comunidad Económica Europea) establecen como valores máximos para el amonio entre 0.5 y 1 mg/l, mientras para México, no está especificado, ya que registra como nitrógeno total en la Norma Oficial Mexicana (NOM-001-SEMARNAT-1996) indicando como límite máximo permisible, una concentración promedio mensual de 15 mg/l, para descargas en ríos y embalses destinados a la protección de la vida acuática (Ramírez-Carrillo *et al.*, 2009); y los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001/89), 0.06 mg/l como nitrógeno amoniacal, para la protección de la vida acuática en agua dulce (Anónimo, 1989; INE - SEMARNAP, 2000).

Por lo tanto, en base a las normas internacionales, la concentración de amonio obtenido se encontraron por encima del rango permisible.

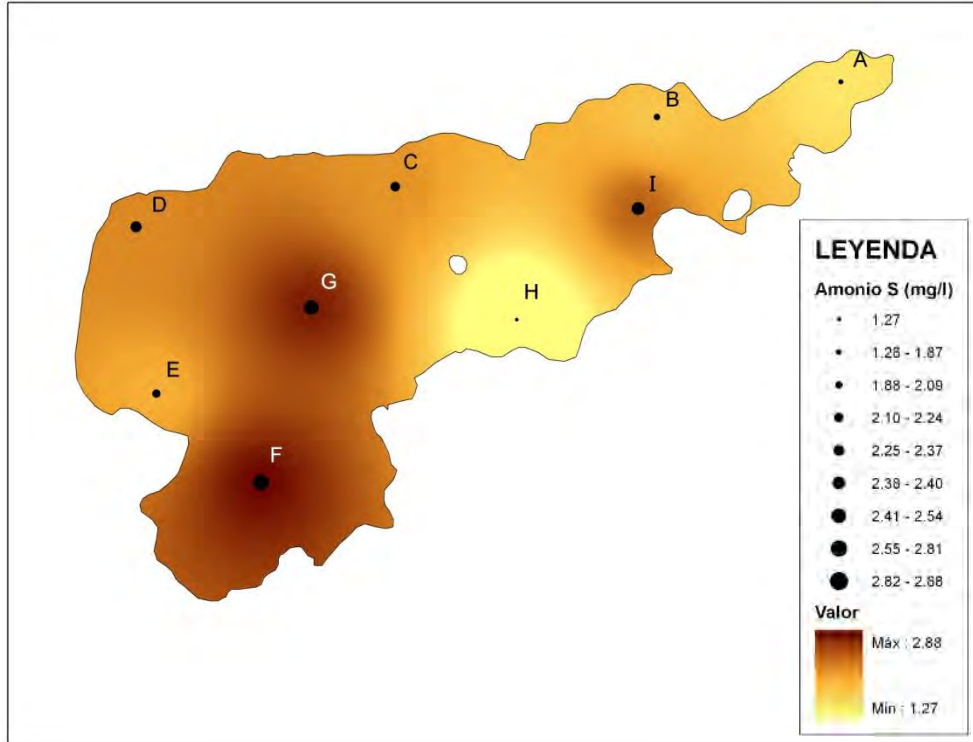


Fig. 18. Concentración de amonio en la superficie (S) por estación de muestreo

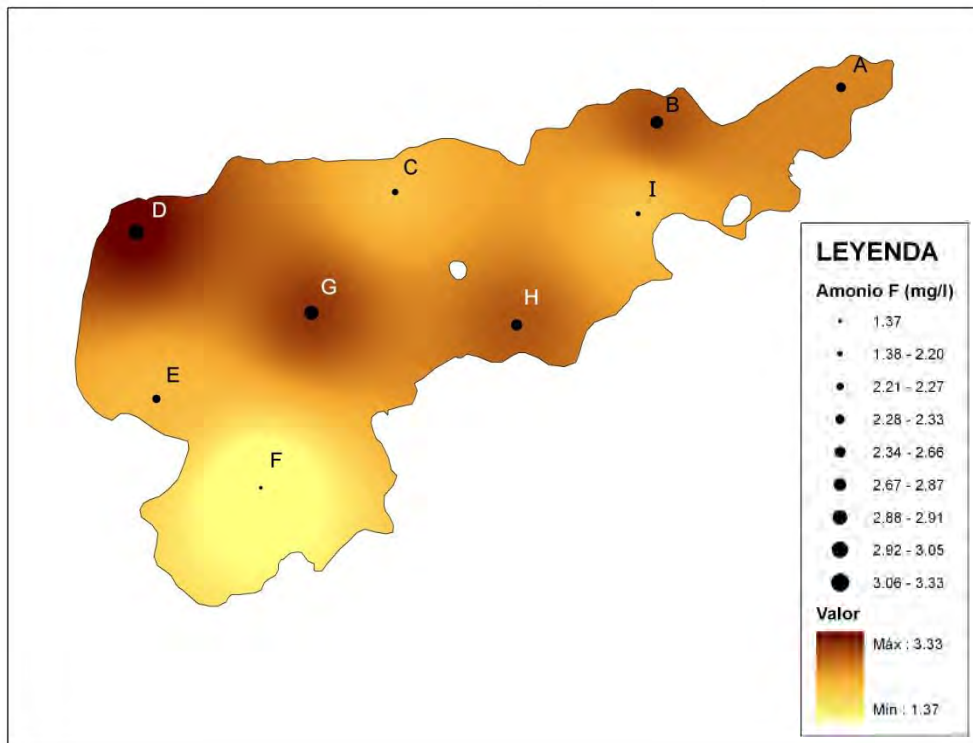


Fig. 19. Concentración de amonio en el fondo (F) por estación de muestreo

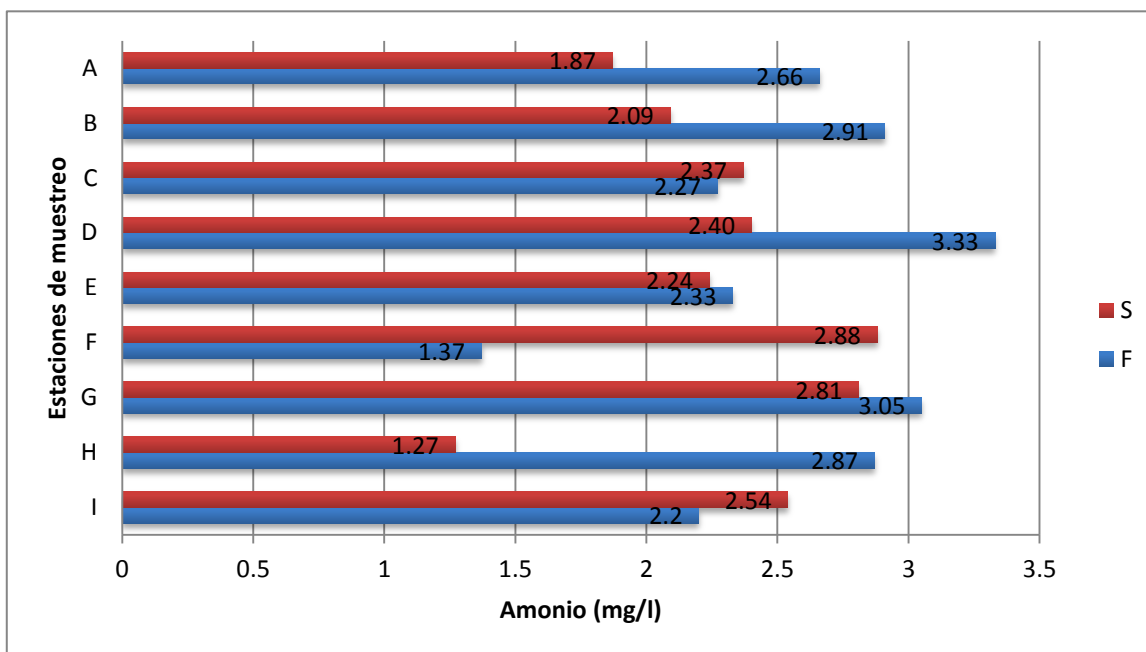


Fig. 20. Variación de la concentración de amonio en la superficie (S) y fondo (F) por estación de muestreo

Nitritos y Nitratos.

La concentración de nitritos encontrados en la superficie fluctuó entre 0.001 y 0.008 mg/l (Fig. 21) y en el fondo entre 0 y 0.009 mg/l (Fig. 22). Los valores máximos tanto en la superficie como en el fondo se encontraron en la estación A y los valores mínimos en la estación D. Hubo 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 (Fig. 23).

El comportamiento en promedio de los nitritos fue de 0.004 mg/l en la superficie y 0.003 mg/l en el fondo (Tabla 2).

El valor más alto de nitratos en la superficie se observó en la estación D con 1.6 mg/l (Fig. 24) y en el fondo en la estación C con 1.3 mg/l (Fig. 25). El valor mínimo se observó tanto en la superficie como en el fondo de la estación B con 0.9 y 0.5 mg/l respectivamente (Fig. 26).

Los nitratos presentaron un promedio general de 1.3 mg/l en la superficie y 0.9 mg/l en el fondo (Tabla 2).

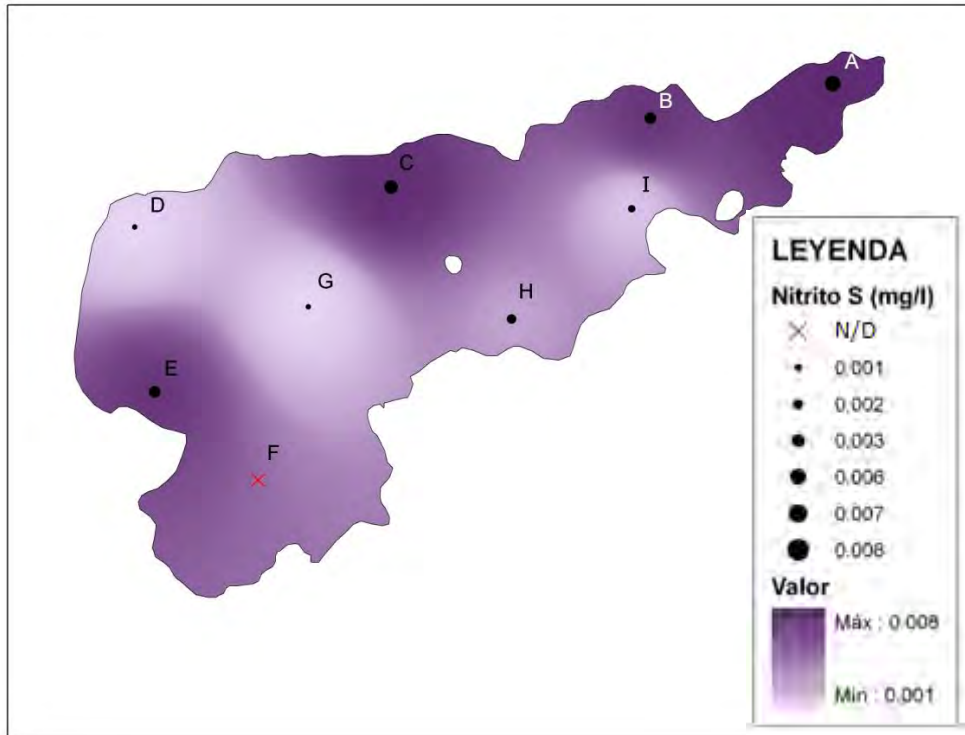


Fig. 21. Concentración de nitritos en la superficie (S) por estación de muestreo (N/D = no detectable)

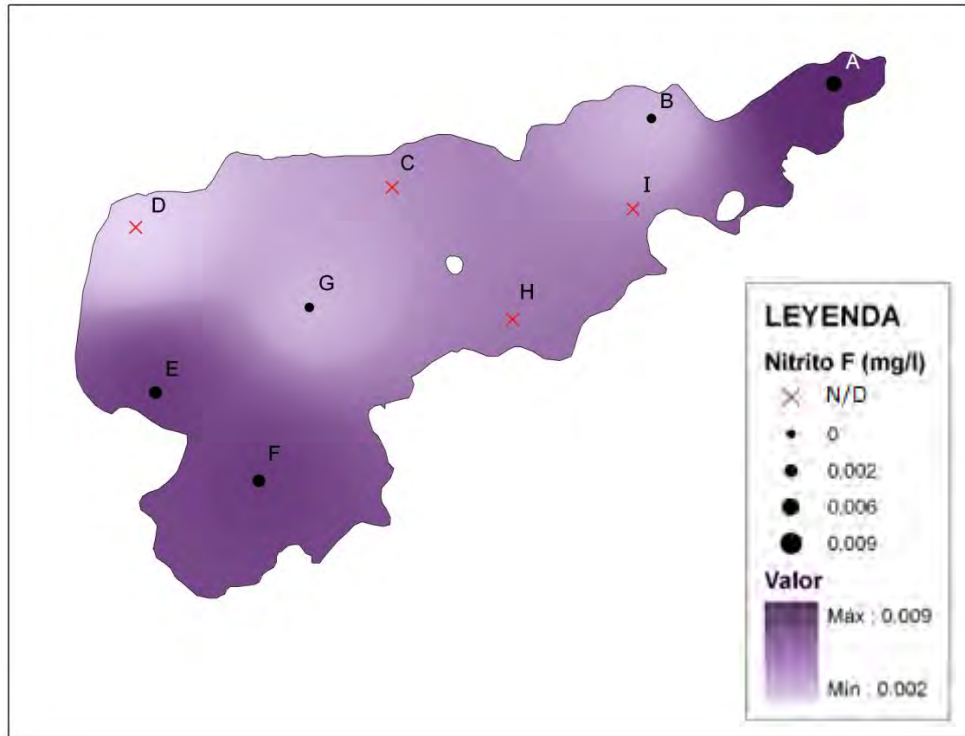


Fig. 22. Concentración de nitritos en el fondo (F) por estación de muestreo (N/D = no detectable)

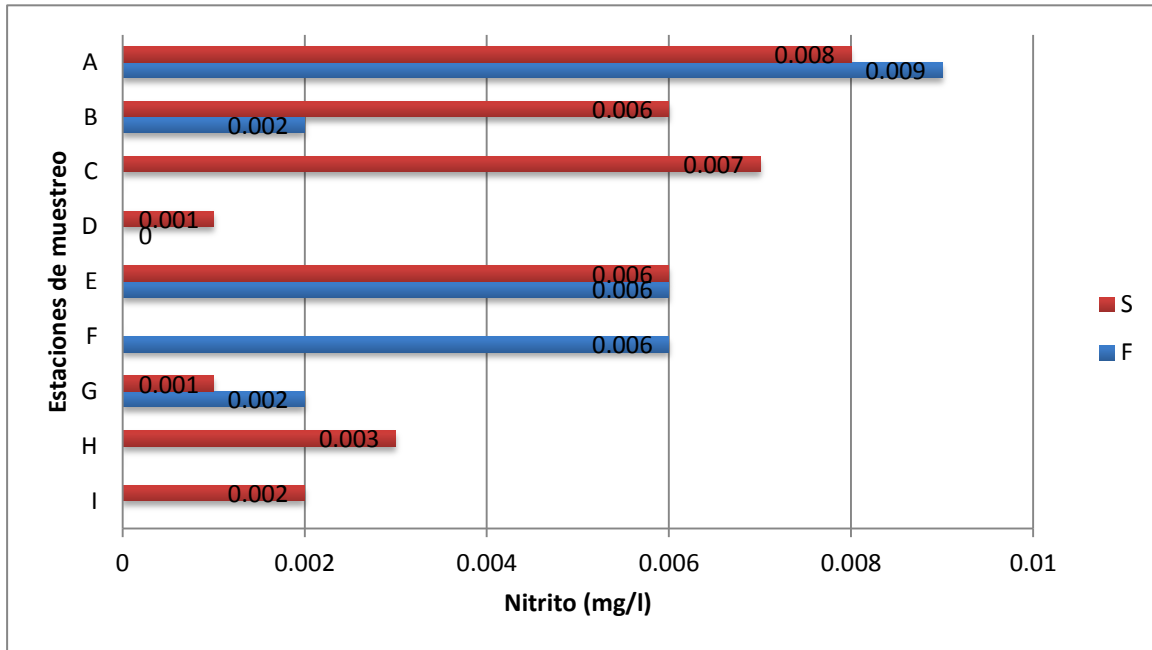


Fig. 23. Variación de la concentración de nitritos en la superficie (S) y fondo (F) por estación de muestreo

En general los nitratos son pocos abundantes en aguas superficiales (Comisión Nacional del Agua, 2007) y son reducidos naturalmente a nitritos. En el caso de la calidad del agua para la protección de vida acuática, las normas internacionales (Recomendación Nacional Actual sobre Criterios de Calidad del Agua de los Estados Unidos de América y Directiva 78/659/CEE de la Comunidad Económica Europea) establecen como valores máximos para los nitritos entre 0.05 y 0.09 mg/l y nitratos entre 0.5 y 0.3 mg/l; mientras para México, también (como el amonio) no está especificado en la Norma Oficial Mexicana (NOM-001-SEMARNAT-1996) para descargas en ríos y embalses destinados a la protección de la vida acuática (Ramírez-Carrillo *et al.*, 2009); tampoco hay en los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001/89) para la protección de la vida acuática en agua dulce; sin embargo, sí hay criterios para agua marina (o áreas costeras) refiriendo a los nitritos y nitratos con un máximo permisible de 0.002 mg/l y 0.04 mg/l respectivamente (INE - SEMARNAP, 2000).

Por lo tanto, en base a las normas internacionales, los valores obtenidos de nitritos (con algunos valores indetectables) se encontraron adentro del rango permisible, pero los nitratos no. Pero, de acuerdo a los CE-CCA-001/89 para la protección de la vida acuática en agua marina, en algunas de las estaciones los nitritos se encontraron por encima del

límite máximo permisible (5 de la superficie y 3 del fondo). Con referencia a los nitratos, se observó que de igual manera sus concentraciones sobrepasaron el límite máximo permisible.

Una vez más, esto muestra la posibilidad de un aporte de descargas de aguas residuales domésticas (es común la presencia de nitratos y nitritos en aguas almacenadas en cisternas en comunidades rurales), de fertilizantes nitrogenados y la contaminación por la acumulación de excretas humanas y animales (Barrenechea-Martel, 2004).

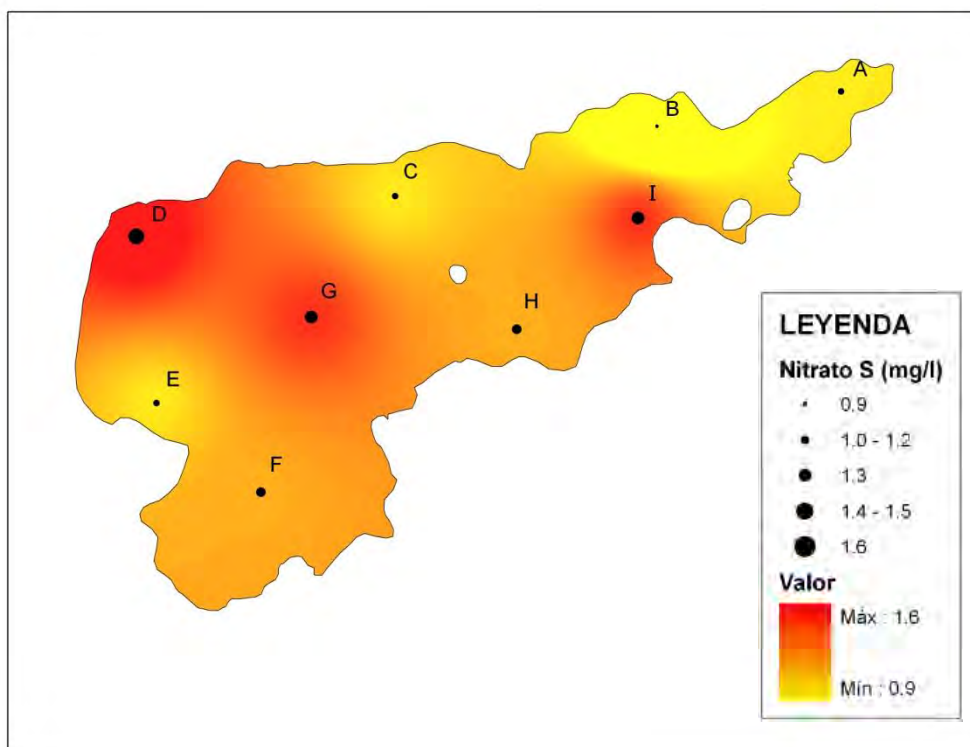


Fig. 24. Concentración de nitratos en la superficie (S) por estación de muestreo

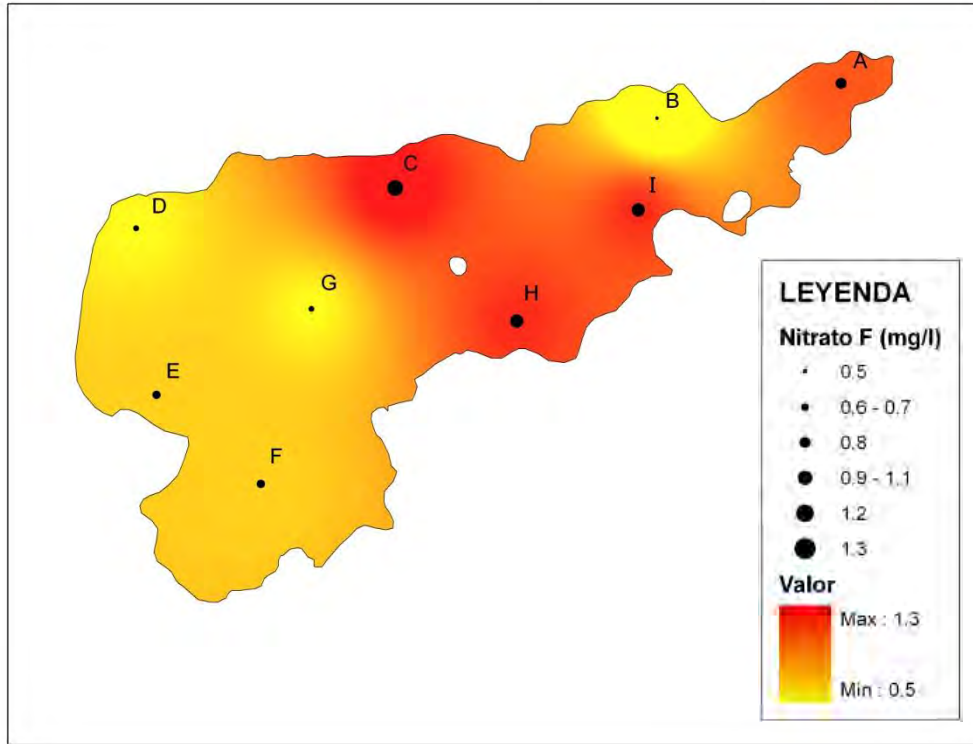


Fig. 25. Concentración de nitratos en el fondo (F) por estación de muestreo

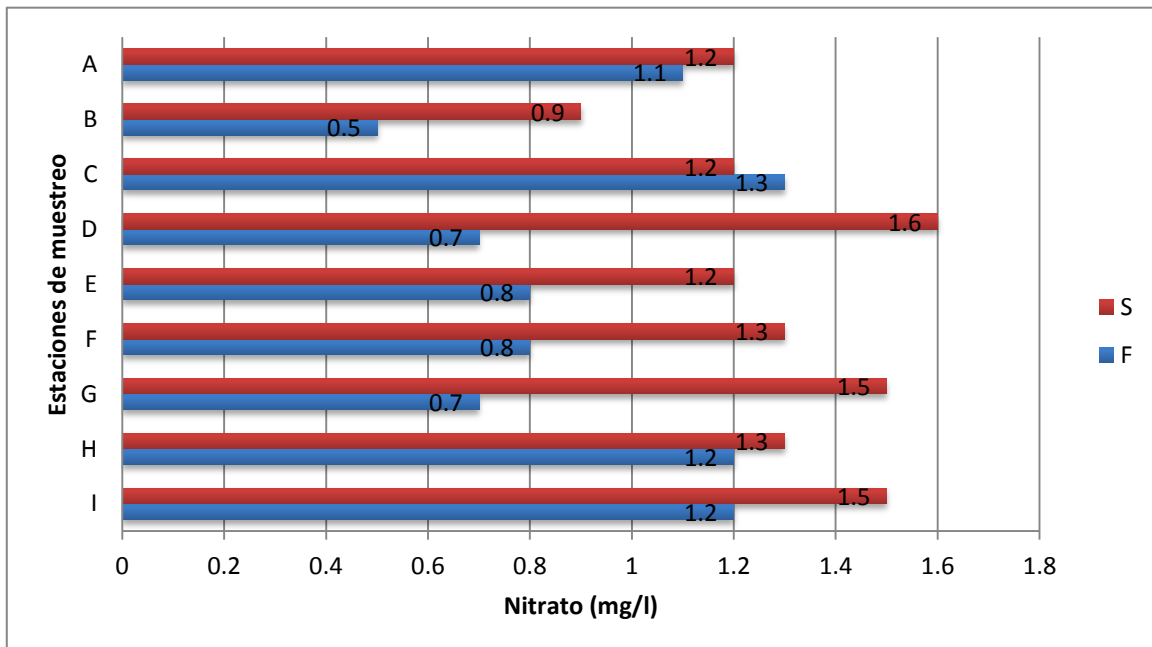


Fig. 26. Variación de la concentración de nitratos en la superficie (S) y fondo (F) por estación de muestreo

Granulometría

En la laguna Milagros, se observaron dos tipos de sedimentos, arena mediana y arena gruesa. La arena mediana se encontró en las estaciones A, F, G y H, y la arena gruesa en las estaciones B, C, D, E e I (Fig. 27).

De manera general, las arenas gruesas es el tipo de sedimento que predomina ligeramente en la laguna Milagros. Se puede observar que la arena gruesa se presenta más en la parte norte y noroeste de la laguna, mientras que la arena mediana en la parte sur y sur-este. La variación espacial en la textura de los sedimentos de la laguna puede ser debido a la influencia por la roca madre, por la erosión de las paredes de la cubeta lacustre, el arrastre de sedimentos por los flujos turbulentos que se presentan durante la época de lluvias torrenciales, y por los fuertes oleajes y corrientes causado por los vientos (Pérez-Rojas *et al.*, 1994).

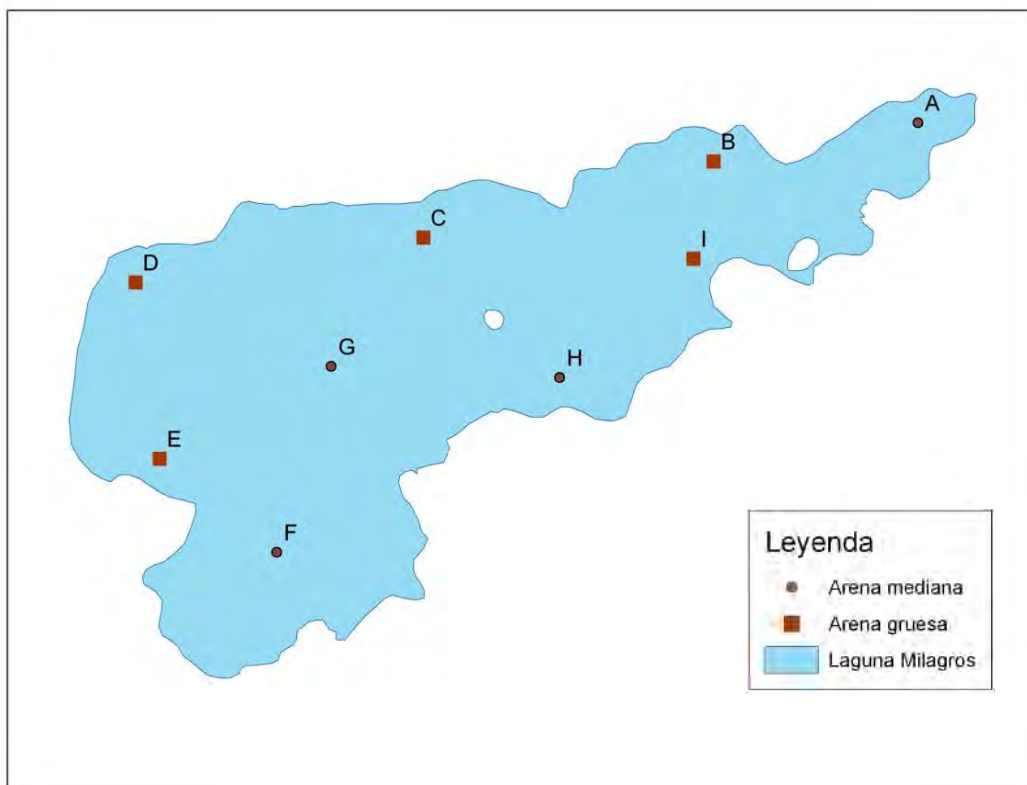


Fig. 27. Tipos de sedimentos de la laguna Milagros en las estaciones de muestreo

Morfometría y Batimetría

La laguna Milagros presenta una longitud máxima de 3.63 km y una anchura máxima de 1.65 km. Su área total es de 3.13 km² con un perímetro de 11.10 km. La profundidad máxima de la laguna es de 4.7 m y su volumen de 5,100,156 m³ (Tabla 3).

En la Fig. 28 se observa el mapa batimétrico de la laguna Milagros mostrando las curvas de nivel encontradas.

Tabla 3. Resultados de los parámetros morfológicos y morfométricos de la laguna Milagros, Huay-Pix, Q. Roo.

Parámetros	Resultados
Longitud máxima	$L_{\text{máx}} = 3.63 \text{ km}$
Ancho máximo	$B = 1.65 \text{ km}$
Área total	$a = 3.13 \text{ km}^2$
Perímetro o longitud de la línea de costa	$l_o = 11.10 \text{ km}$
Área superficial	$A = 3.12 \text{ km}^2$
Ancho medio	$B_m = 0.86 \text{ km}$
Índice de desarrollo de la línea de costa	$F = 1.77$
Profundidad máxima	$D_{\text{máx}} = 4.7 \text{ m}$
Profundidad media	$D_m = 1.63 \text{ m}$
Profundidad relativa	$D_r = 0.2 \%$
Volumen	$V = 5,100,156 \text{ m}^3$
Índice de desarrollo del volumen	$V_d = 1.04$

La longitud ($L_{\text{máx}}$) y ancho máximo (B) de la laguna Milagros son de 3.63 km y 1.65 km respectivamente (Fig. 29). Estos parámetros se encuentran relacionados con la transferencia de energía del viento hacia la laguna, ya que, cuando más grande sea la superficie del agua, mayor será el recorrido del viento sobre esta, lo que determina la magnitud del oleaje y por lo tanto la transferencia de energía. También, la distribución de los organismos y materiales están relacionados a la circulación del viento (Herrera-Anzures, 2002).

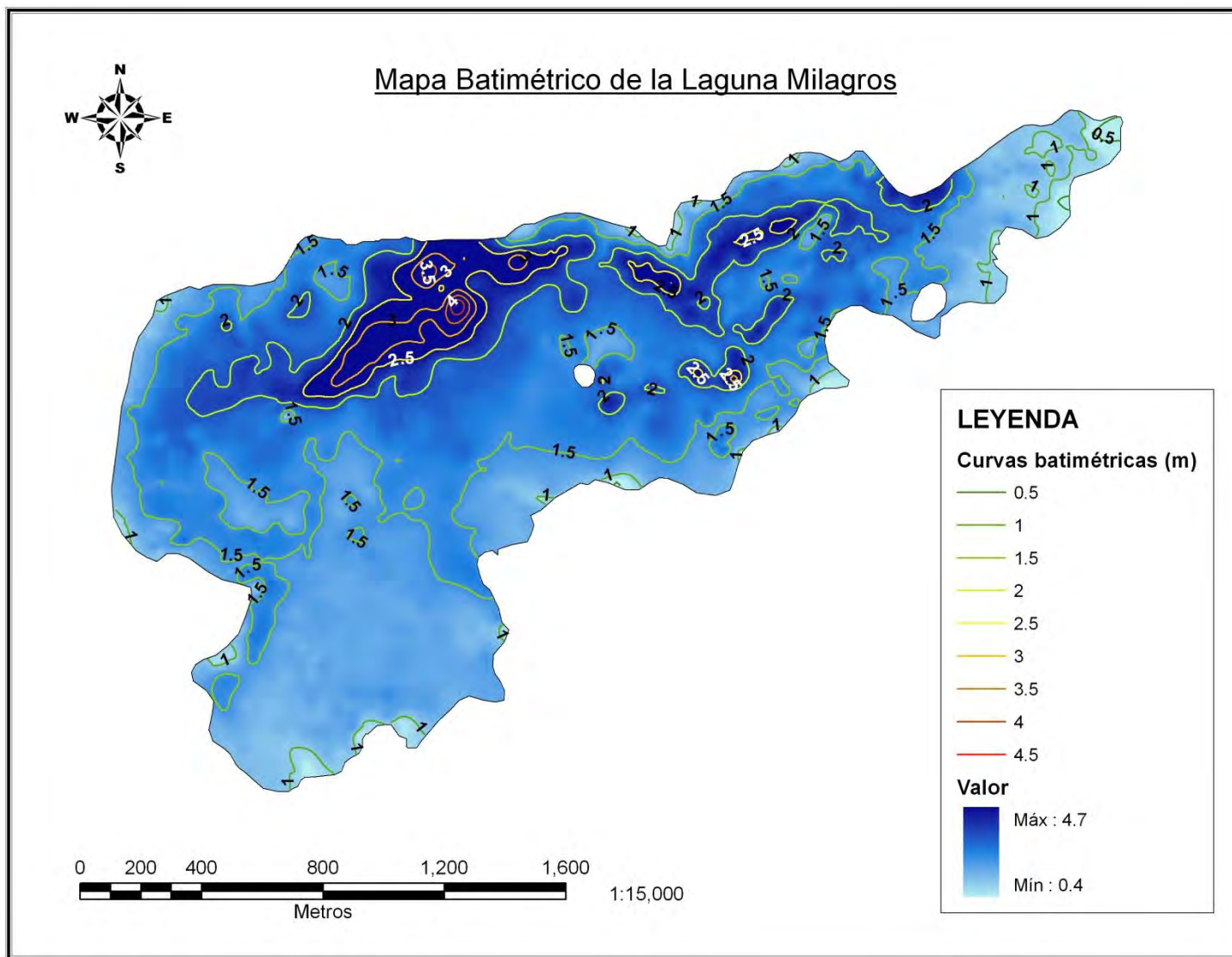


Fig. 28. Mapa batimétrico de la laguna Milagros



Fig. 29. Medición de la longitud (3.63 km) y ancho máximo (1.65 km) de la laguna Milagros mediante el *Google Earth*.

El área total (a) de la laguna es 3.13 km^2 ; eliminando las pequeñas islas que se encuentran dentro de la laguna y solamente la parte inundada, es el área superficial (A) siendo de 3.12 km^2 aproximadamente. El perímetro o longitud de la línea de costa (l_0) es de 11.1 km (Fig. 30); este parámetro se encuentra relacionado directamente a la geomorfología y a la tasa de sedimentación que ha estado ocurriendo desde la formación de las lagunas hasta la actualidad y además está relacionada indirectamente a la productividad primaria de cada sistema, ya que mientras mayor sea la línea de costa de un sistema, mayor será la posibilidad de la colonización de la vegetación circundante como macrófitas, manglares y algas epifíticas, que contribuyen a la productividad total de cada laguna (Herrera-Anzures, 2002). Se observó que en el perímetro de la laguna Milagros, especialmente del sur, son en gran parte vegetación con la presencia de mangle.

Con respecto a la forma de la cuenca, el índice de desarrollo de la línea de costa (F) nos proporciona una medida de la irregularidad del perímetro. La laguna Milagros presenta un índice de 1.77, siendo un valor que se encuentra por encima de 1, por lo tanto nos indica que la forma de la cuenca es irregular (Roldán-Pérez y Ramírez-Restrepo, 2008). Por lo tanto, es importante conocer F, porque la puerta de entrada de los nutrientes a la

laguna es función del perímetro. Teóricamente, comparando dos lagunas similares en todos sus rasgos morfométricos, excepto en F, aquella con mayor F será más productivo. Como es el caso de las dos lagunas del poblado de Subtte. López tienen índices de desarrollo del litoral de 1.388 y 1.293 (Díaz-González, 2004).

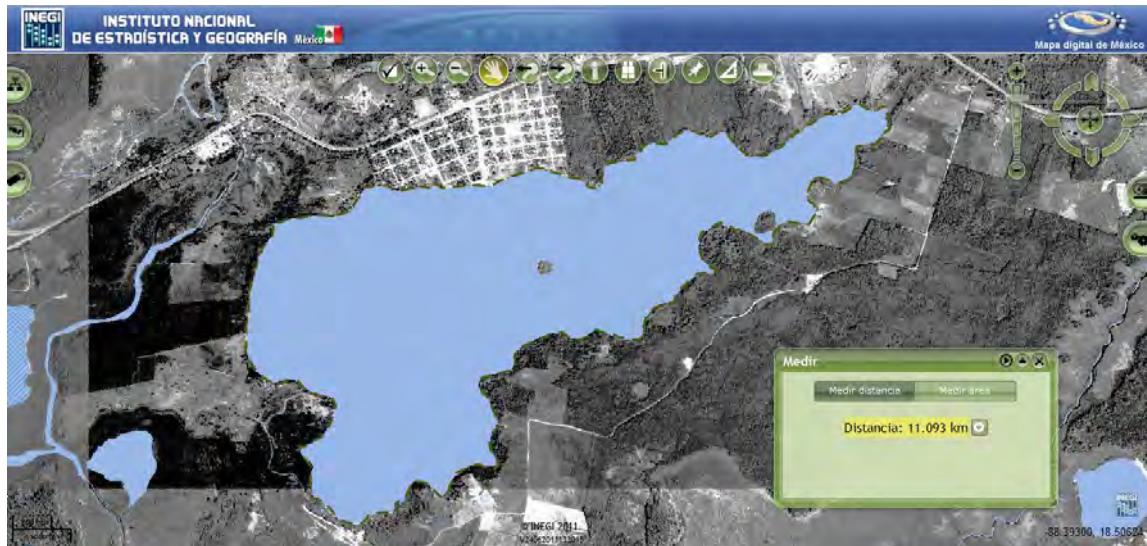


Fig. 30. Medición del área total (3.13 km²), área superficial (3.12 km²) y perímetro (11.1 km) de la laguna Milagros mediante el *Mapa Digital de México*

Por lo general, la profundidad máxima ($D_{\text{máx}}$) que presentó la laguna fue de 4.7 m que se ubica enfrente de la población de Huay-Pix (Fig. 28). Sin embargo, el valor de la profundidad máxima, o más bien, de las profundidades, pueden fluctuar levemente de una temporada a otra dependiendo de la época de lluvias y secas (Herrera-Anzures, 2002); y la profundidad media (D_m) fue de 1.63 m, siendo un parámetro que ha sido considerado determinante en la producción de un sistema acuático.

En cuanto a la profundidad relativa (D_r), es en general mayor en los cuerpos de agua pequeños cuando comparados con las lagunas grandes. Los cuerpos de agua con una profundidad relativa baja están menos protegidos contra el viento y muestran, por tanto, menor transparencia; lo cual indica un incremento en la producción fotosintética. Además, es indicador de la estabilidad de la columna de agua: a mayor profundidad relativa, mayor sea la estabilidad. Los cuerpos de agua profundos y de área pequeña tienen valores de profundidad relativa mayor a 4%, mientras que aquellos de poca profundidad y área grande, valores menos de 2% (Roldán-Pérez y Ramírez-Restrepo, 2008). Se obtuvo el

valor 0.235% para la profundidad relativa de la laguna Milagros, que está menos protegida contra el viento, lo que causa la turbiedad del ambiente; también indica que la columna de agua tiene una alta inestabilidad, o dicho de otra manera, tiene una escasa resistencia a la mezcla de agua (Pérez-Rojas y Torres-Orozco, 1992), muy común en ambientes con bajas profundidades y una área grande ($D_r < 2\%$) (Roldán-Pérez y Ramírez-Restrepo, 2008) como sucede en la laguna Milagros.

La mayor parte de la laguna tiene menos de 2 m de profundidad y las partes más profundas se encuentran hacia el norte, en frente de la población (Fig. 28). Esto puede ser debido a su origen, geología, fisiografía, actividades antropogénicas como la excavación para la construcción de muelles u otras actividades. De acuerdo a los datos observados de la profundidad, la laguna Milagros tiene profundidades menores a 10 m, por lo tanto, se clasifica como un sistema somero (Barbanti, 1985).

Finalmente, la laguna Milagros posee un volumen (V) de 5,100,156 m³ y el índice de desarrollo del volumen (V_d) es de 1.04, como éste valor se aproxima a 1, esto significa que el perfil de la laguna presenta la forma de un cono invertido, con una forma ligeramente cóncava (Fig. 4.), asemejándose a la forma de un senoide elíptico.

Los cálculos de los resultados de los parámetros morfométricos son mostrados en el Anexo 1.

CONCLUSIONES

De manera general, la laguna Milagros se caracteriza por ser un cuerpo de agua perenne, con una profundidad somera de agua cálida y turbia, con un pH neutro con tendencias hacia la acidez y con aguas bien oxigenadas con una elevada concentración de nutrientes.

De acuerdo a las normas internacionales (Recomendación Nacional Actual sobre Criterios de Calidad del Agua de los Estados Unidos de América y Directiva 78/659/CEE de la Comunidad Económica Europea), las concentraciones de amonio y nitratos se excedieron el rango permisible de la calidad del agua para la protección de vida acuática, mientras los nitritos se encuentra dentro del rango aceptable bajo estas normas.

El pH y los nutrimentos presentes en la laguna Milagros demuestra la posibilidad de que la laguna está afectado por descargas antropogénicas de origen industrial, agrícola, municipal y/o doméstica, influenciando también a los demás parámetros.

En cuanto a la granulometría, se observó que el tipo de sedimento que posee la laguna Milagros es de arena mediana y arena gruesa, predominando ligeramente este último.

La laguna Milagros es un cuerpo de agua con área grande y poca profundidad, lo cual causa que está menos protegida contra el viento provocando que la columna de agua presenta alta inestabilidad y muestra muy escasa resistencia a la mezcla de agua.

La forma de la cuenca que presenta la laguna Milagros es irregular y su cubeta lacustre es de forma como la de un cono invertido, siguiendo levemente una forma cóncava o sinusoide elíptico.

La información generada en el presente trabajo contribuye al conocimiento limnológico en la parte sur de Quintana Roo, por lo que puede considerarse como una línea base para futuros estudios en la laguna.

RECOMENDACIONES

Realizar muestreos mensuales o estacionales de parámetros físicos, químicos y biológicos para comprender mejor el comportamiento de la laguna, y tomar medidas de conservación, preservación y aprovechamiento.

Investigar posibles fuentes que aporten nutrientes y sales a la laguna.

Determinar la productividad biológica o el estado trófico, lo cual incluye la medición de la clorofila α y ortofosfatos.

Conocer el comportamiento temporal de la columna de agua para establecer las posibles estratificaciones o mezclas.

Realizar estudios sobre la contaminación y calidad del agua.

Además, establecer normas o criterios ecológicos de amonio, nitritos y nitratos para la protección de vida acuática en aguas superficiales o aguas dulces.

LITERATURA CITADA

- Anónimo (1989). *Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89* (D.O.F. 13 Diciembre 1989).
- Ahumada-Sempoal, M. A. y Ruiz-García, N. (2008). Características fisicoquímicas de la Laguna Pastoría, Oaxaca, México. *Ciencia y Mar*, XII(36): 3-17.
- Alcocer, J. y Escobar E. (1993). Morphometric characteristics of six Mexican coastal-lakes related to productivity. *Revista de Biología Tropical*, 41: 171-179
- Anónimo (2011). *Laguna Milagros, México*. Consultado en feb. 08, 2012 en <http://www.lakelubbers.com/laguna-milagros-1969/>.
- APHA (1995). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 19th Edition. American Public Health Association, Washington, DC.
- Arredondo-Figueroa, J. L., Borrego-Enríquez, L. E., Castillo-Domínguez, R. M. y Valladolid-Laredo, M. A. (1983). Batimetría y Morfometría de los Lagos "Maars" de la Cuenca de Oriental, Puebla, México. *Biotica*, 8(1): 37-47.
- Banderas-Tarabay, A., González-Villela, R., y de la Lanza-Espino, G. (1991). Limnological aspects of a high-mountain lake in Mexico. *Hydrobiologia*, 224: 1-10.
- Barbanti, L. (1985). Some problems and new prospects on physical limnology - Lymnology: a review. *Memorie dell' Istituto Italiano di Idrobiol*, 43: 1-32.
- Barrenechea-Martel, A. (2004). Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua, in: Vargas. L. Tratamiento de agua para consumo humano. 55 p.
- Carrillo-Ruiz, A. A. (2003). Caracterización de la Flora Bacteriana y Fúngica en la Columna de Agua del Sistema Lagunar Bacalar (Tesis de Licenciatura, Universidad de Quintana Roo). 60 p.
- Cervantes, M. (2007). *Conceptos fundamentales sobre ecosistemas acuáticos y su estado en México*. pp. 37-67. En: Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México. INE-SEMARNAT, D.F.

- Cervantes-Martínez, A., Elías-Gutiérrez, M. y 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: 167-177.
- Cervantes-Martínez, A. (2005). Análisis limnológico de dos sistemas cársticos (cenotes) de la Península de Yucatán, México con énfasis en la variación espacial y temporal del zooplancton (Tesis de Doctorado, El Colegio de la Frontera Sur, ECOSUR). 102 p.
- Clean Water Team (CWT) (2004). *Electrical conductivity/salinity Fact Sheet, FS-3.1.3.0 (EC)*. in: The Clean Water Team Guidance Compendium for Watershed Monitoring and Assessment, Version 2.0. Division of Water Quality, California State Water Resources Control Board (SWRCB), Sacramento, CA.
- Comisión Nacional del Agua (2007). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. D. F.: Gerencia de Cuencas Transfronterizas de la Comisión Nacional del Agua. 320 p.
- Cruz-Angeles, M. A. (2000). Aspectos Morfométricos de Tres Lagunas Costeras De Chiapas, La Carreta, Pereyra y el Bobo (Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, México). 21 p.
- De la Lanza-Espino, G. y Lozano-Montes, H. (1999). Comparación fisicoquímica de las lagunas de Alvarado y Términos. *Hidrobiológica*, 9(001): 15-30.
- Díaz-González, W. V. (2004). Caracterización morfométrica de tres sistemas hidrológicos de la parte sur del Estado de Quintana Roo (Residencia Profesional, Instituto Tecnológico de Chetumal). 6 p.
- Díaz-Vargas, M., Elizalde-Arraiga, E. E., Quiroz-Castelán, H., García-Rodríguez, J. y Molina-Estudillo, I. (2005). Caracterización de Algunos Parámetros Físico Químicos del Agua y Sedimento del Lago Zempoala, Morelos, México. *Acta Universitaria*, 15(002): 57-65.
- Flores-Nava, A., Valdez-Lozano, D. y Sanchez-Crespo, M. (1989). Comportamiento fisicoquímico de una manifestación cárstica de Yucatán. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*, 16: 223-229.

- Flores-Tena, F. J. y Silva-Briano, M. (1995). A note on El Niagara, a polluted reservoir in Aguascalientes, Mexico. *Hydrobiologia*, 308: 235-241.
- Florida LAKEWATCH (2001). *A Beginner's Guide to Water Management – Lake Morphometry* (Segunda edición). Gainesville: University of Florida / Institute of Food and Agricultural Sciences. 32 p.
- Florida LAKEWATCH (2001). *A Beginner's Guide to Water Management - Water Clarity* (Tercera edición). Gainesville: University of Florida / Institute of Food and Agricultural Sciences. 33 p.
- Florida LAKEWATCH (2004). *A Beginner's Guide to Water Management – Oxygen and Temperature* (Primera edición). Gainesville: University of Florida / Institute of Food and Agricultural Sciences. 28 p.
- Fornerón, C. F., Piccolo, M. C. y Carbone, M. E. (2010). Análisis morfométrico de la laguna Sauce Grande (Argentina). *Huellas*, 14: 11-30.
- Fuentes, F. y Massol-Deyá, A. (2002). *Manual de Laboratorios: Ecología de Microorganismos*. Universidad de Puerto Rico, Puerto Rico.
- Hammer, U.T. (1986). *Saline Lake Ecosystems of the World*. Dordrecht: Dr W. Junk Publishers. 632 p.
- Herrera-Anzures, L. (2002). Batimetría y Análisis Morfométrico de las Lagunas Chantuto y Panzacola, Chiapas (Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Metropolitana). 19 p.
- INEGI (2010). *Censo de Población y Vivienda 2010*. Consultado en feb. 16, 2012 en http://www.inegi.org.mx/sistemas/consulta_resultados/iter2010.aspx?c=27329&s=e st.
- INE - SEMARNAP (2000). *La Calidad del Agua en los Ecosistemas Costeros de México* (Primera edición). México.

- Maas-Vargas, M. G. (2009). *Laguna de Bacalar Research*. Colegio de Bachilleres del Estado de Quintana Roo, Plantel Bacalar. Consultado en abr. 16, 2012 en http://www.lagunabacalarinstitute.com/Maas-Bacalar_Research.pdf
- Márquez-García, A. Z., Calva-Benítez, L. G. y Pérez-Rojas, A. (2006). Consideraciones batimétricas del sistema lagunar Carretas-Pereyra, Chiapas, México. *Hidrobiológica*, 16(002): 121-126.
- Montoya-Moreno, Y. (2008). Caracterización Morfométrica de un Sistema Fluviolacustre Tropical, Anioquia, Colombia. *Caldasia*, 30(2): 413-420.
- Pérez-Rojas, A. y Torres-Orozco, R. (1992). Geomorfología y Batimetría del Lago de Catemaco, Veracruz, México. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*, 19(1): 19-24.
- Pérez-Rojas, A., Torres-Orozco, R. y Márquez-García, A. Z. (1994). Los sedimentos recientes del lago de Catemaco, Veracruz, México. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*, 20: 67-76.
- Periódico Oficial del Gobierno del Estado de Quintana Roo (2005). *Decreto por el cual se establece el Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial de la Región de Laguna de Bacalar, Quintana Roo, México*. 123 p.
- Ramírez-Carrillo, H. F., Luna-Pabello, V. M., Arredondo-Figueroa, J. L. (2009). Evaluación de un humedal artificial de flujo vertical intermitente, para obtener agua de buena calidad para la acuicultura. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 8(1): 93-99.
- Roldán-Pérez, G. A. y Ramírez-Restrepo, J. J. (2008). *Fundamentos de limnología neotropical* (2° edición). Medellín: (Editorial Universidad de Antioquia). 440 p.
- Ruiz-Sevilla, G. (2002). Variaciones morfométricas del lago de Zirahuén (Tesis de Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo). 100 p.

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

Torres-Orozco, R. E., Jiménez-Sierra, C. y Buen-Abad, J. L. (1994). Caracterización Limnológica de dos cuerpos de agua tropicales de Veracruz, México. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*, 21: 107-117.

Vergara-Sánchez, M. A. (2007). *Desarrollo Integral y Sustentable de Lagunas Costeras Mexicanas*. 25 p.

PROGRAMAS

ESRI, 2011. *ArcGIS 10 - ArcMap 10* [Programa de ordenador]. New York: ESRI. [Usado: 29 marzo 2012]. Disponible en: <http://www.esri.com/software/arcgis/arcgis10>

Google Earth (Versión 6.1.0.5001) [Software]. Google Inc. (2011). Disponible en: <http://www.google.com/intl/es/earth/index.html>

INEGI (2012). *Mapa Digital de México (Versión 5.0)* [Programa en línea] en: <http://gaia.inegi.org.mx/mdm5/viewer.html>

Vargas-Hernández, J. M. (1991). *Análisis Granulométrico de Sedimentos (Versión 1.0)* [Programa de computación]. Veracruz: Museo de Zoología. Facultad de Biología. Universidad Veracruzana, Xalapa.

ANEXOS

Anexo 1. Cálculos de los resultados de los parámetros morfométricos

Parámetros	Cálculos
Longitud máxima	$L_{\text{máx}} = 3.63 \text{ km}$
Ancho máximo	$B = 1.65 \text{ km}$
Área total	$a = 3.13 \text{ km}^2 (3,130,000 \text{ m}^2)$
Perímetro o longitud de la línea de costa	$l_o = 11.10 \text{ km}$
(Área de las 2 islas: $4286.119 \text{ m}^2 + 10262.602 \text{ m}^2$)	
Área superficial	$A = 3.13 \text{ km}^2 - (0.004286119 + 0.010262602)\text{km}^2 = 3.12 \text{ km}^2$
Ancho medio	$B_m = A / L_{\text{máx}} = 3.12 \text{ km}^2 / 3.63 \text{ km} = 0.86 \text{ km}$
Índice de desarrollo de la línea de costa	$F = l_o / 2(\pi A)^{0.5} = 11.10 \text{ km} / 2(\pi 3.12 \text{ km}^2)^{0.5} = 1.77$
Profundidad máxima	$D_{\text{máx}} = 4.7 \text{ m}$
Profundidad media	$D_m = V / a = 5,100,156 \text{ m}^3 / 3,130,000 \text{ m}^2 = 1.63 \text{ m}$
Profundidad relativa	$D_r = [D_{\text{máx}} 100] / [2(a/\pi)^{0.5}] = 470 / 1996 = 0.235 \%$
Volumen	$V = 5,100,156 \text{ m}^3$
Índice de desarrollo del volumen	$V_d = 3D_m / D_{\text{máx}} = 4.89 / 4.7 = 1.04$



Anexo 2. Botella Van Dorn de 1 L de capacidad



Anexo 3. Espectrofotómetro portátil Hach DR/2010



Anexo 4. Tamizador (rotor) tipo RX-29



Anexo 5. Ecosonda digital Garmin GPSMAP 421s