

# Batimetría y análisis morfométrico del lago de Atitlán (Guatemala)

## Bathymetry and morphometric analysis of Atitlán Lake

Fátima Reyes Morales, Domingo Ujpan, Samuel Valiente

Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Atitlán y su Entorno

fatimarys3@gmail.com

Recibido: 25 de mayo de 2017 Aceptado: 9 de octubre de 2017

### Resumen

La cuenca del lago de Atitlán es de tipo endorreica y cuenta con el cuerpo de agua más profundo de Centroamérica, sin embargo, desde el año 1975 no se tiene información actualizada de su batimetría ni de su morfometría. El objetivo de desarrollar un estudio batimétrico en el lago de Atitlán, fue determinar su morfometría, y así poder comprender en el futuro algunos procesos físicos, químicos y biológicos. Para el levantamiento batimétrico del lago de Atitlán, durante 2014 se tomaron datos de profundidad a lo largo y ancho de todo el espejo de agua con una ecosonda de multi-frecuencia. Posteriormente la información fue procesada y se obtuvieron 16 parámetros morfométricos, tales como volumen, área, perímetro, profundidad máxima, fetch efectivo, longitud y ancho máximo, entre otros. El área superficial del lago obtenida fue de 125.77 km<sup>2</sup>, el perímetro de 101.67 km y un volumen de 25.46 km<sup>3</sup>. El lago de Atitlán es un sistema tropical profundo y de forma cóncava, según la curva hipsográfica, tiene una profundidad máxima de 327.56 m, una media de 203.21 m. El mapa batimétrico del 2014, presenta pocas diferencias morfométricas y morfológicas en comparación con el que se realizó en el año 1975.

Palabras clave: morfometría, mapa batimétrico, curva hipsográfica, fetch efectivo, sistema tropical profundo.

## Abstract

The lake Atitlan basin is endorheic and is the deepest body of water in Central America. Information regarding its bathymetry and morphometry has not been updated since 1975. The objective of a bathymetric study in lake Atitlán was to determine its morphometry and in the future, understand some physical, chemical and biological processes. For the bathymetric survey of lake Atitlán, during 2014, depth data were taken along the lake with a multi-frequency echo sounder. Later the information was processed and 16 morphometric parameters were obtained, such as volume, area, perimeter, maximum depth, effective fetch, length and maximum width, among others. The surface area of the lake obtained was 125.77 km<sup>2</sup>, perimeter of 101.67 km and a volume of 25.46 km<sup>3</sup>. Lake Atitlan is a deep tropical system with a maximum depth of 327.56 m, an average depth of 203.21 m and concave; according to the hypsographic curve. The bathymetric map of the year 2014, presents few morphometric and morphological differences compare with the one that was realized in 1975.

Keywords: morphometry, bathymetric map, agregar hypsographic curve, effective fetch, deep tropical system.

## Introducción

La caracterización morfométrica de un cuerpo de agua debe ser el punto de partida de las investigaciones limnológicas (Margalef, 1983), ya que permite conocer las profundidades y el relieve del fondo de un cuerpo de agua, facilitando así, las estrategias de conservación y manejo de la cuenca. Algunos estudios de morfometría datan desde 1888 en Escocia (Murray, 1988), pero no fue hasta 1957, cuando Hutchinson (1957) desarrolló a fondo el tema, seguido de Wetzel (1983), Cole (1979), Håkanson (1981) y Kalff (2002), quienes establecieron los principales parámetros morfométricos que se deben tener de un cuerpo de agua. La geomorfología de un lago determina las características de su drenaje, la entrada de nutrientes y de sólidos, y el tiempo de residencia. La forma, volumen, área y profundidad de la cubeta, tienen un efecto en la temperatura, el balance térmico y en la estratificación de la columna de agua (Lewis, 1996). Por ejemplo, la profundidad y el área de

un lago puede afectar la tasa de oxigenación y la disponibilidad de nutrientes en la columna de agua, por lo tanto, se puede utilizar para inferir en el metabolismo de un cuerpo de agua, (e. g. lagos de origen tectónico o volcánicos, que son usualmente muy profundos) presentan valores bajos de productividad primaria (Wetzel, 2001).

La morfología de un lago se describe mediante un mapa batimétrico detallado, necesario para la evaluación de los principales parámetros morfométricos. La importancia del estudio de la batimetría y morfometría en lagos reside principalmente en la influencia que puedan tener los factores climatológicos, geológicos y antropogénicos en los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren dentro de los cuerpos de agua (Alcocer et al., 2016), Oseguera, Sánchez, González, Martínez, & González, 2016). En América y en otras regiones del mundo se han realizado algunas investigaciones morfométricas en lagunas (Fornerón, Piccolo, & Carbone,

2010), embalses (Hernani & Ramírez, 2002) y lagos (Wirrmann, 1991; Takano et al., 2004; Montoya, 2005; Anzidei et al., 2008., Yesuf, Alamirew, Melesse, & Assen, 2013; Alcocer et al., 2016). En Centroamérica no existen estudios actuales sobre batimetría que detallen la morfometría de otros lagos en la región, ni mapas batimétricos.

En Guatemala, no existen estudios batimétricos excepto un estudio batimétrico elaborado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) en 1975, en el lago Atitlán. No obstante, la batimetría del lago de Atitlán no se había actualizado desde el año 1975, pese a la importancia que tienen los estudios morfométricos de los ambientes limnéticos. Por esta razón, el objetivo principal de este trabajo fue estimar los principales rasgos morfométricos y batimétricos del lago Atitlán, con el fin de utilizarlos para una futura planificación de las actividades que se realizan en el lago e implementar una estrategia de manejo integral de la cuenca.

## Materiales y métodos

El área de estudio se encuentra en el altiplano del país, dentro de la Reserva de Uso Múltiple de la Cuenca del Lago de Atitlán (RUMCLA), que fue creada en 1997 mediante el Decreto 64-97 y es administrada por el Consejo Nacional de Áreas Protegidas (CONAP) (Santizo & Secaira, 2007), en coordinación con la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Atitlán y su Entorno (AMSCLAE).

La cuenca del lago de Atitlán es un sistema endorreico que se localiza en las coordenadas 425000 X y 1625000 Y. El área de la cuenca es de 124.5 km<sup>2</sup> y se divide en dos principales sub-cuencas (río Quiscab y río San Francisco) y varias microcuencas río San Buenaventura, río

la Catarata y río Tzununá). El lago se encuentra ubicado a una altitud de 1,556 m.s.n.m, en el departamento de Sololá, en la región occidental de Guatemala (Figura 1).

La batimetría del lago de Atitlán se realizó tomando datos de la profundidad por medio de una ecosonda de multi-frecuencia Hydrotrac y se georreferenciaron los sitios con un sistema de posicionamiento global (GPS) DGPS Hemisphere. Durante los meses de mayo y junio de 2014 se realizaron 270 líneas principales de navegación con una separación entre líneas de 100 m, navegando con una orientación 140° de ida y 320° de retorno; y 13 líneas secundarias de navegación, con una separación de 1,000 m entre cada una, navegando con una orientación 247° de ida y 67° de retorno. Para el procesamiento de los datos obtenidos en campo, se utilizaron los programas Hypack® Max, 3d Surfer® 12 y Arc Gis® 10.2, los cuales arrojaron como resultado el mapa batimétrico y los principales parámetros morfométricos del lago de Atitlán, tales como volumen, área, perímetro, profundidad máxima, longitud y anchura máxima.

Para obtener el resultado de la distancia máxima de actuación del viento sobre las olas en el espejo de agua a partir de un punto determinado (fetch efectivo), se analizaron los datos de la dirección del viento de las cinco estaciones climatológicas de la AMSCLAE, ubicadas en la parte norte (3) y sur (2) de la cuenca del lago Atitlán. Después de obtener la orientación promedio de acción del viento, se estimó la longitud mediante planos digitalizados.



**Figura 1.** Mapa de ubicación de la zona de estudio del lago de Atitlán.

## Resultados

El mapa batimétrico del lago de Atitlán del año 1975 y el realizado en el año 2014 se presentan en las figuras 2 y 3, respectivamente.

En la tabla 1, se presentan los valores de los principales parámetros morfométricos para el lago de Atitlán, los cuales describen la forma y las características físicas del lago.

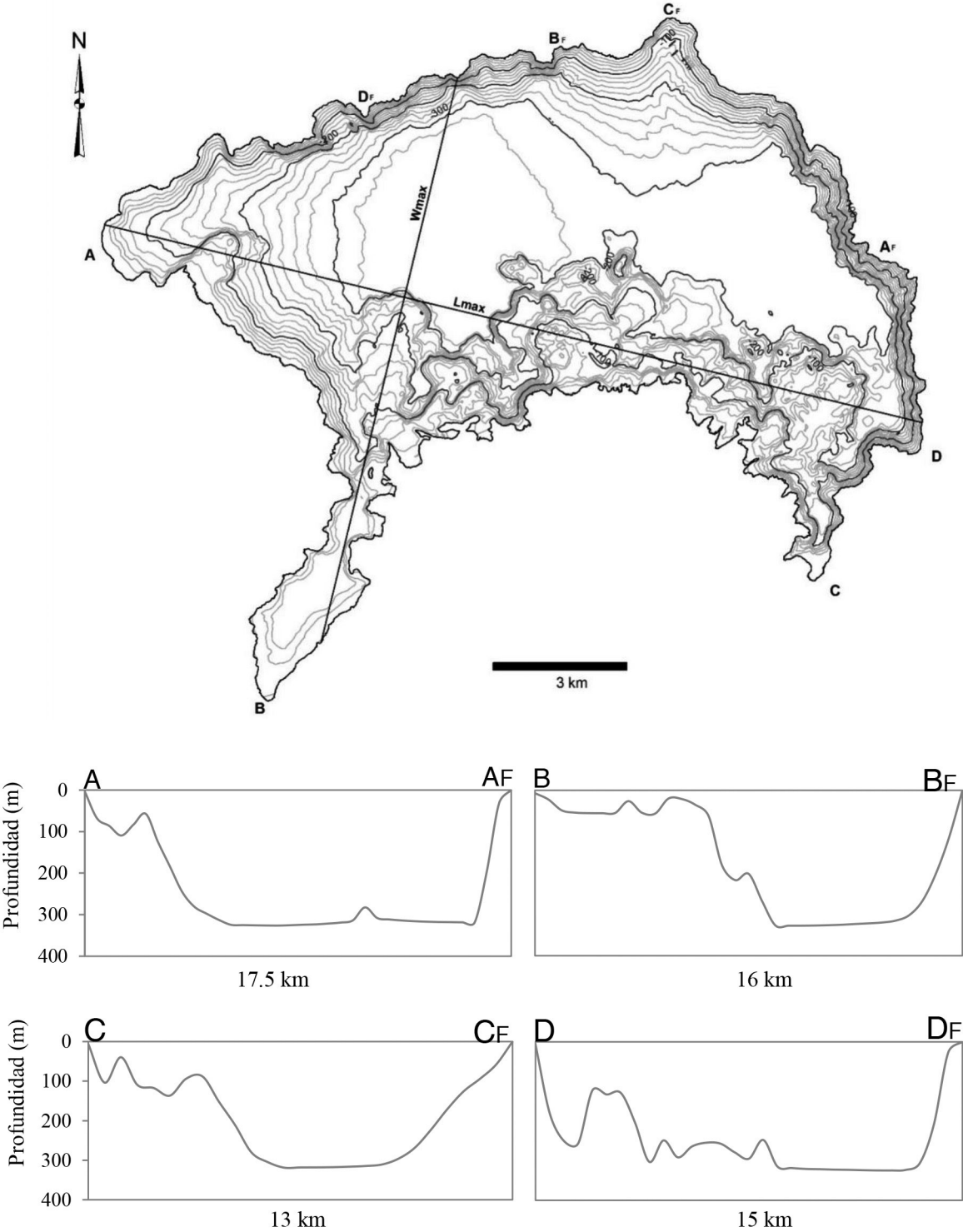
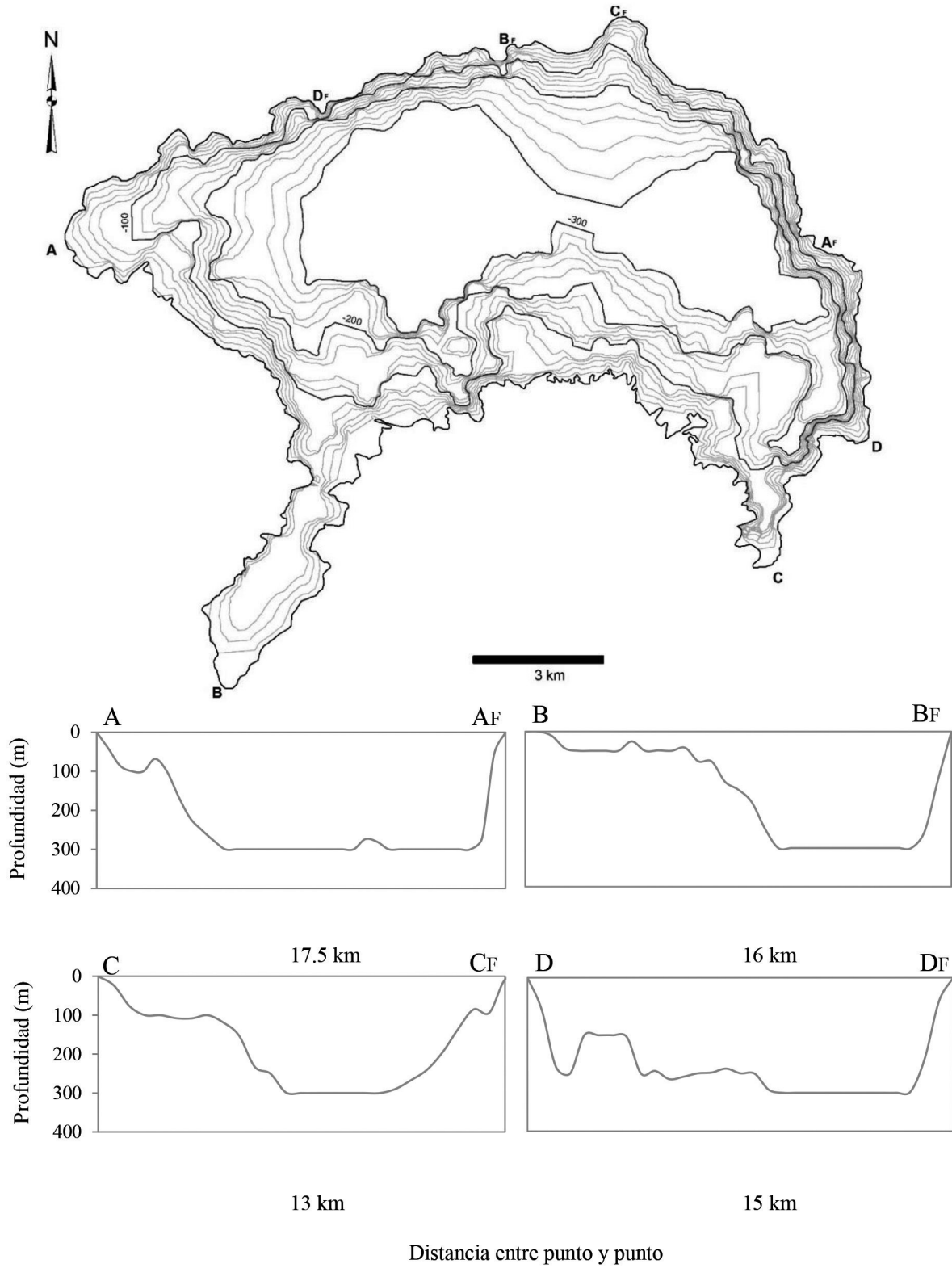


Figura 2. Mapa batimétrico y perfiles correspondientes a los transectos A, B, C y D del lago de Atitlán, año 2014.



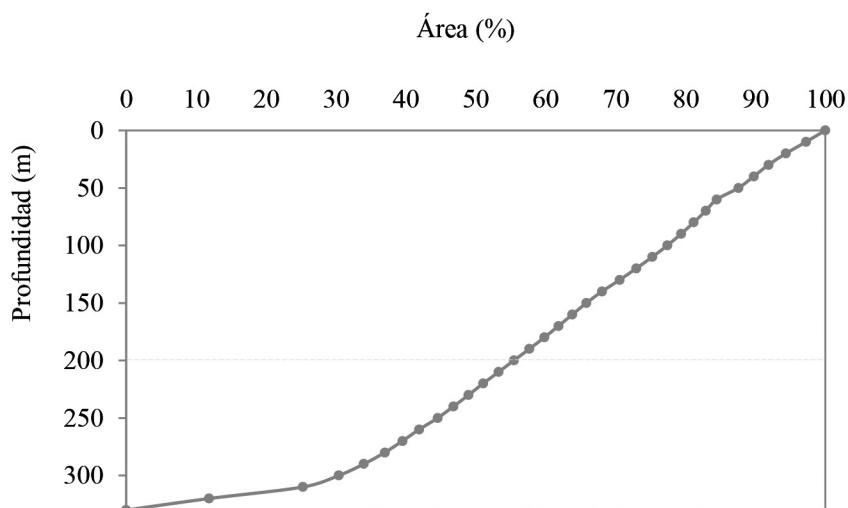
**Figura 3.** Mapa batimétrico y perfiles correspondientes a los transectos A, B, C y D del lago de Atitlán, año 1975 (IGN, 1975).

**Tabla 1.** Parámetros morfométricos del lago de Atitlán.

| Parámetro                            | Sigla     | Valor  | Parámetro                | Sigla     | Valor   |
|--------------------------------------|-----------|--------|--------------------------|-----------|---------|
| Área de la cuenca (km <sup>2</sup> ) |           | 546.03 | Perímetro (km)           | $I_o$     | 101.67  |
| Área total (km <sup>2</sup> )        | $a$       | 125.78 | Ancho máximo (km)        | $W_{máx}$ | 13.04   |
| Área superficial (km <sup>2</sup> )  | $A$       | 125.77 | Ancho medio (km)         | $W$       | 6.65    |
| Volumen (km <sup>3</sup> )           | $V$       | 25.46  | Profundidad máxima (m)   | $D_{máx}$ | 327.56  |
| Índice de desarrollo de costa        | $F$       | 2.56   | Profundidad media (m)    | $D_m$     | 202.40  |
| Índice de desarrollo de volumen      | $V_d$     | 1.85   | Profundidad relativa (%) | $D_r$     | 2.59    |
| Longitud máxima (km)                 | $L_{máx}$ | 18.91  | Fetch efectivo (km)      | $L_f$     | 9.58    |
| Longitud máxima efectiva (km)        | $L_e$     | 18.91  | Forma del lago           |           | Cóncava |

En el mapa batimétrico se observa que el lago es un cuerpo de agua profundo (327 m) y extenso (125 km<sup>2</sup>), que está formado por una única cubeta y dos bahías. Las máximas pendientes se sitúan en la zona noroeste y este; las menores pendientes se dan en la zona sur (Figura 2).

En la curva hipsográfica relativa del área versus la profundidad (Figura 4), se puede observar que la mitad de los valores de profundidad se encuentran por encima del valor medio de profundidad. La forma del lago de Atitlán en función de la curva hipsográfica, es cóncava, según la clasificación propuesta por Håkanson (1981).



**Figura 4.** Curva hipsográfica del lago de Atitlán.

## Discusión

Las principales diferencias entre el mapa batimétrico del 2014 y el realizado en el año de 1975, se observan principalmente en las áreas someras o en las zonas cercanas a la orilla del lago. Los perfiles A - A<sub>F</sub> y D - D<sub>F</sub> muestran que la parte norte, tiene pendientes pronunciadas en los primeros metros de la zona litoral; en estas zonas la profundidad puede ascender abruptamente desde los 50 m hasta los 300 m. Los perfiles B - B<sub>F</sub> y C - C<sub>F</sub> muestran como la parte sur del lago de Atitlán, es una zona con pendientes suaves que van desde la orilla del lago hacia el centro (Figuras 2 y 3). Las diferencias entre ambos mapas batimétricos y entre los perfiles de la zona norte y sur, puede estar aunadas a la oscilación del nivel máximo del agua del lago de Atitlán, originada por eventos climáticos extremos y a la actividad sísmica de los últimos años (i.e., terremoto, 1976 y 2012; huracán Mitch, 1998; huracán Stan, 2005; tormenta Agatha, 2010), como ha ocurrido en otras regiones (Anzidei et al., 2008; Yesuf et al., 2013). Las corrientes y el oleaje que originan los vientos nor-noroeste y los eventos naturales, han tenido influencia en el transporte y en la deposición de los sedimentos que ingresan por la escorrentía superficial en la zona paralela a toda la orilla del lago, alterando la morfometría y batimetría del lago de Atitlán, tal como sucede en el lago Hayq, Etiopía (Yesuf et al., 2013).

El desarrollo de costa (F), (i.e., la relación existente entre el perímetro ( $I_o$ ) y la longitud ( $L_{máx}$ ), fue de 2.56). Un lago con un desarrollo de costa igual a uno indica que es un lago circular, y va aumentando a medida que su forma se vaya alargando o la orilla sea irregular. Por lo tanto, se considera que el lago de Atitlán tiene un índice de desarrollo de costa alto, lo que indica que la forma del lago es irregular,

por lo tanto, hay mayores posibilidades para el desarrollo de comunidades bentónicas y de una zona litoral amplia (Roldán & Ramírez, 2008; Alcocer et al., 2016).

Un parámetro importante que determina el grado de sedimentación, es el volumen del lago ( $V$ ). Lagos con grandes volúmenes son una consecuencia natural de la evolución de la cubeta de un lago, pues a medida que este envejece, el índice de desarrollo de volumen se va incrementando por la acumulación de sedimentos, transformándose de una forma cónica o en V, en el caso de lagos jóvenes, o en forma de U, en el caso de lagos más evolucionados o viejos (Benjumea, Wills, & Aguirre, 2007; Fornerón et al., 2010; Roldán & Ramírez, 2008). En el caso del lago de Atitlán, el volumen ( $V$ ) y el índice de desarrollo de volumen ( $V_d$ ) fue de 25.47 km<sup>3</sup> y 1.86, respectivamente, lo que indica que es un ambiente acuático evolucionado, de tipo cóncavo y en forma de U (Håkanson, 1981; Rico, Chicote, González, & Montes, 1995). No obstante, el volumen total del lago es muy dinámico, este puede oscilar en ±.088 km<sup>3</sup> por año, esto debido a la estacionalidad, los tiempos de residencia y/o eventos climáticos extremos (huracanes, tormentas tropicales, sequías). El desarrollo de volumen del lago Atitlán en comparación con otros lagos, e.g. Craterlake ( $V_d$  1.65), lago Tahoe ( $V_d$  1.87), lago Baikal ( $V_d$  1.65), se encuentra dentro del rango de valores de lagos volcánicos y profundos (Byrne, 1962).

El fetch efectivo, (i.e., distancia sobre la cual el viento tiene posibilidad de producir oleaje) (Malhotra & Fonseca, 2007), fue de 9.58 km sobre los 23° NNE. Tradicionalmente se ha relacionado la profundidad de la termoclina con el tamaño del lago y en particular con la distancia en la superficie del agua sobre la cual



puede actuar el viento o fetch, o bien con su longitud máxima. El efecto del viento sobre el lago de Atitlán tiene que ver principalmente con el rompimiento de la estratificación térmica de la columna de agua (termoclina) y la oxigenación de las capas superficiales (oxiclina) (Bejumea, Wills, & Aguirre, 2007; Roldán & Ramírez, 2008).

La profundidad media ( $D_m$ ), es el parámetro morfométrico que mejor caracteriza el funcionamiento y producción de un cuerpo de agua, además de la estructura ecosistémica de un ambiente acuático. La relación  $D_m/D_{max}$  del lago fue de 0.62 lo cual caracteriza una cubeta de forma elipsoidal, con fondos de pendientes muy bajas y paredes litorales inclinadas (Figuras 2 y 4) (Fornerón et al., 2010; Roldán & Ramírez, 2008).

La profundidad relativa, (i.e., profundidad máxima dividida por el diámetro medio del lago), se considera como un indicador de la estabilidad de la columna de agua (Alcocer et al., 2016). Wetzel (1983) señala que la mayoría de los lagos tienen una profundidad relativa ( $Dr$ ) menor del 2%, mientras que los profundos y de superficie pequeña tienen generalmente valores mayores al 4%, y están más protegidos contra el viento y presentan una mayor estabilidad. En el caso del lago de Atitlán el valor de la profundidad relativa fue de 2.59%, por lo tanto, se considera que la estabilidad de la columna del agua es alta. Lagos someros tienden, en términos relativos, a formar una termoclina menos estable que los grandes. La termoclina del lago de Atitlán es bastante estable (Reyes et al., 2016), pues la superficie relativa de intercambio de calor con la atmósfera es menor.

La batimetría del lago de Atitlán realizada en el año 2014 permitió conocer su perfil de fondo,

su morfología y morfometría en comparación con el estudio realizado en el año 1975. Debido a la resolución del mapa del año 1975 y la falta de datos, no se pudo realizar los cálculos morfométricos correspondientes. Sin embargo, se considera que las diferencias son mínimas, tal y como se puede observar en las figuras 2 y 3. Las diferencias pueden deberse a la oscilación del nivel máximo del agua en el lago de Atitlán en un ciclo estacional, el cual puede variar entre 0.45 m a 0.90 m de profundidad (Xaminez & Reyes, 2016). Esta variación depende principalmente de la estacionalidad de la pluviometría, los aportes de aguas superficiales y los procesos de evaporación y precipitación dentro de la cuenca, (e.g. tormentas, sequías, lluvias intensas y período de la canícula que haya habido durante un año).

Los valores morfométricos hallados para el lago de Atitlán, se encuentran dentro de los rangos típicos de lagos con origen volcánico. La mayoría de los principios de la limnología pueden ser demostrados con base en la comparación entre lagos. La comparación entre los mismos permite obtener generalidades sobre los procesos de eutrofización, características de la cuenca y condiciones de manejo. La morfometría y batimetría de los lagos de la región de América, Europa y Asia, está influenciada por el origen geológico y la topografía de la región.

El lago de Atitlán es un lago profundo con una cubeta en forma de U, con fondo de pendientes muy altas y una cierta irregularidad de la línea de costa. La profundidad relativa es baja en comparación a otros lagos de origen volcánico y profundos. Todas estas características le confieren al lago la formación evidente de un gradiente vertical físico y químico que determina la dinámica vertical y temporal de las comunidades biológicas, (e.g. la termoclina

y oxiclina se ubica entre los 25 y 35 m de profundidad y la distribución del fitoplancton entre los 5 y 15 m de profundidad) (Reyes et al., 2016).

### Agradecimientos

Este trabajo se realizó gracias al apoyo del Ministerio de la defensa nacional, Empresa portuaria quetzal, Empresa portuaria nacional Santo Tomas de Castilla, Comandancia y capitania lacustre del lago de Atitlán, en el marco de la Comisión interinstitucional de investigación Hidro-Oceanográfica (CIIHO). Se agradece al Capitán Oliverio Gonzáles, Juan Carlos Bocel y Julio Méndez de la AMSCLAE y a todas aquellas personas e instituciones que apoyaron de una u otra forma el desarrollo de esta investigación para que llegara a término.

### Referencias

- Alcocer, J., Oseguera, L., Sánchez, G., González, G., Martínez, J., & González, R. (2016). Bathymetric surveys of the Montebello Lakes, Chiapas. *Journal of limnology*, 75(1), 56-65.
- Anzidei, M., Carapezza, M., Esposito, A., Giordano, G., Lelli, M., & Tarchini, L. (2008). The albano maar lake high resolution bathymetry and dissolved CO<sub>2</sub> budget (Colli Albani volcano, Italy): Constrains to hazard evaluation. *Journal of volcanology and geothermal research*, 171(3-4), 258-268.
- Benjumea, C., Wills, A. & Aguirre, N. (2007). Principales aspectos morfométricos de la ciénaga de Cachimbero, Santander, Colombia. *Gestión y ambiente*, 11(2), 1-8.
- Byrne, J. V., (1962). Bathymetry of crater lake, Oregon. *The ore bin*, 24(10), 161-164.
- Cole, G. A. 1979. *Textbook of Limnology*. St. Louis, Toronto, London: The C. V. Mosby Company.
- Fornerón, C., Piccolo, M. & Carbone, M.(2010). Análisis morfométrico de la laguna Sauce Grande (Argentina). *Huellas*, 14, 11-30.
- Håkanson, L. (1981). *A manual of lakemorphometry*. Berlin: Springer Verlag.
- Hernani, T. A. & Ramírez, J. J. 2002. Aspectos morfométricos y teóricos de un embalse tropical de alta montaña: Represa La Fé, El Retiro Colombia. *Caldasia*, 101, 511-518.
- Hutchinson, G. E. (1957). *A treatise on limnology. Vol I. Geography, physics and chemistry*. New York, Chapman & Hall.
- Kalff, J. (2002). *Limnology. Inland Water Ecosystems*. New Jersey: Prentice Hall.
- Lewis, W. (1996). Tropical lakes: how latitude makes a difference. In: F. Schiemer & K.T. Boland (Eds.) *Perspective in tropical limnology*. (pp. 43-64). Amsterdam: SPB Academic Publishing.
- Malhotra, A. & Fonseca, M. S. (2007). *WEMO (Wave Exposure Model): Formulation, procedures and validation*. (NOAA Technical memorandum NOS NCCOS #65). North Carolina: NOAA.

- Margalef, R. (1983). *Limnología*. Barcelona, España: Omega.
- Montoya - Moreno, Y. (2005). Caracterización morfológica básica de tres lagos someros en el municipio de El Carmen de Viboral (Antioquia), Colombia. *Actualidades biológicas*, 27, 79-86.
- Murray, J. (1988). On the effects of winds on the distribution of temperatures in the sea and freshwater lochs of the west of Scotland. *Scottish geographical magazine*, 4(7), 345 - 357.
- Reyes, F., Barreno, F., Arriola, I., Martínez, M., Martínez, C., Xamínez, N., & Ujpan, D. (2016). *Informe monitoreo limnológico 2016*. Departamento de investigación y calidad ambiental de la autoridad para el manejo sustentable de la cuenca del lago de Atitlán y su entorno. Sololá, Guatemala.
- Rico, E., Chicote, A., González, M.E. & Montes, C. (1995). Batimetría y análisis morfológico del lago de Arreo (N. España). *Limnética*, 11(1), 55-58.
- Roldán, G. & Ramírez, J. (2008). *Fundamentos de limnología neotropical*. Antioquia, Colombia: Editorial Universidad de Antioquia.
- Santizo, A. & Secaira, E. (Eds.) (2007). *Plan maestro de la reserva de uso múltiple cuenca del Lago de Atitlán*. Consejo Nacional de Áreas Protegidas (CONAP). Guatemala. Guatemala: Serviprensa.
- Takano, B., Suzuki, K., Sugimori, K., Ohba, T., Fazlullin, S., Bernard, A. ... Hirabayashi, M. (2004) Bathymetric and geochemical investigation of Kawak Ijen Crater Lake, East Java, Indonesia. *Journal of volcanology and geothermal research*, 135(4), 299-329.
- Wetzel, R.G. (1983). *Limnology*. Philadelphia: Saunders College Publishing.
- Wetzel, R. (2001). *Limnology: Lake and river ecosystems*. San Diego: Academic Press.
- Wirrmann, D. (1991). Morfología y batimetría. In: C. Dejoux y A. Iltis (Eds.) *El Lago Titicaca, síntesis del conocimiento limnológico actual*. (pp. 31-37). La Paz: Hisbol - ORSTOM.
- Xamínez, N. & Reyes, R. (2016). *Informe anual. Monitoreo del nivel del lago, 2016*. Departamento de investigación y calidad ambiental de la autoridad para el manejo sustentable de la cuenca del lago de Atitlán y su entorno. Sololá, Guatemala.
- Yesuf, H., Alamirew, T., Melesse, A. & Assen, M. (2013). Bathymetric study of Lake Hayq, Ethiopia. *Lakes and reservoirs: research and management*. 18, 55-165.