

El Lago Atitlán, Guatemala: su estado ecológico octubre 2009 – diciembre 2011.

Margaret Dix, Michael Dix, Melissa Orozco, David Cabrera, Estuardo Bocel, Alicia Toledo & Erin Symonds.
Centro de Estudios Atitlán, Universidad del Valle de Guatemala-ALTIPLANO

RESUMEN: El Lago Atitlán, Sololá, Guatemala, fue estudiada durante el período octubre 2009 hasta diciembre 2011, con el fin de obtener información confiable a largo plazo sobre el estado ecológico del lago y su cuenca, la cual podría ayudar en la toma de decisiones para su manejo. Se realizaron muestreos mensuales en seis sitios y se midieron factores físicos, químicos, y clorofila *a*; así como la abundancia del fitoplancton, incluyendo a la cianobacteria, *Lyngbya robusta*, productora de florecimientos. Tomando en cuenta información histórica de 1968 al 1969 y los resultados del presente trabajo, el lago demuestra cambios en su estado ecológico con indicaciones claras de un deterioro en la calidad del agua evidenciada por una disminución en la transparencia del agua y cambios en la composición del fitoplancton, llegando a un estado trófico entre oligotrófico y mesotrófico con florecimientos de *L. robusta*, los cuales impactan en la economía regional. Se concluye que el lago está en un proceso de eutrofización acelerada debido principalmente a aumentos en las concentraciones de los nutrientes nitrógeno y fósforo las cuales contribuyen a aumentar la abundancia y crecimiento del fitoplancton. Se sugiere que además de las entradas de aguas residuales y escurrimiento de campos agrícolas de la cuenca, la precipitación mayor durante los últimos años, la cual conlleva mayor ingreso de nutrientes por medio de aguas pluviales, arrastre de nutrientes del suelo y erosión, puede ser un factor contribuyente.

PALABRAS CLAVE: Lago Atitlán, cianobacteria, ecología, eutrofización, fitoplancton.

Lake Atitlán Guatemala: ecological conditions between October 2009 and December 2011.

ABSTRACT: This paper describes ecological studies carried out between October 2009 and December 2011 on Lake Atitlán, Sololá, Guatemala, in order to acquire long-term data on changes in the ecological state of the lake and surrounding watershed that would contribute to informed decision making for watershed management. Monthly measurements were made at six sites to determine physical, chemical and biological parameters, including chlorophyll *a* and phytoplankton dynamics as well as studies on the bloom forming cyanobacteria, *Lyngbya robusta*. We show changes in the lake's ecological state with clear indicators of water quality deterioration, reduction in

transparency, and changes in phytoplankton composition that suggest a shift from an oligotrophic state towards a more mesotrophic one, with cyanobacterial blooms produced by *L. robusta* that have impacted the regional economy. We conclude that these changes largely result from an increase in available nutrients, nitrogen and phosphate that permit increased phytoplankton abundance and growth. We suggest that, as well as contributions from watershed run-off and sewage, an observed increase in precipitation with concomitant pluvial run-off may be a contributing factor.

KEY WORDS: Lake Atitlán, cyanobacteria, ecology, available nutrients, phytoplankton.

Introducción

El Lago Atitlán, situado en el departamento de Sololá, a 1,565 metros sobre el nivel del mar (msnm), es de origen volcánico y se ubica dentro de una caldera de aproximadamente 85,000 años de edad. El lago está dominado por tres volcanes, al suroeste el volcán San Pedro, (de 60,000 años de edad) y al sur por los volcanes Tolimán y Atitlán (de 30,000 a 40,000 años de edad) con elevaciones de 2,995m, 3,158m y 3,587m, respectivamente. Al norte, las montañas antiguas, como la divisora de María Tecun, tienen una edad de más de 11 millones de años y elevaciones de hasta 3,403 m. Más cerca al lago, de oeste al norte, se encuentran los restos de los volcanes de Paquisís, Tecolote y San Marcos con edades cerca de un millón de años (Dix *et al* 2003).

La cuenca tiene una extensión de 541 Km² y forma parte del área protegida "Reserva de Usos Múltiples de la Cuenca del Lago Atitlán" (RUMCLA) (CONAP 2007). La entidad rectora es la Autoridad para el Manejo Sustentable del Lago de Atitlán y su entorno (AMSCLAE). El volumen de agua es de 24 Km³, con la profundidad máxima mayor a 350 m, y la profundidad promedio de 188 m. Su área superficial es de 137 km². La mayoría del agua recibida proviene de precipitación pluvial y de dos ríos principales permanentes, San Francisco y Quiscab, ambos situados en el norte del lago, respectivamente al este y oeste de Panajachel. Es un lago endorreico, sin salida obvia, aunque se supone que en la parte sur del lago, en las Bahías de San Lucas Tolimán y Santiago Atitlán, existen sitios de infiltración y flujo hacia la cuenca del río Madre Vieja (Weiss, 1971).

Es un destino turístico importante para Guatemala y, con una cultura llena de tradición, colorido y vida, riqueza de biodiversidad y con respuestas marcadas a los cambios ambientales, representa un sistema ideal para estudiar, a escala manejable, el impacto, no solo de las actividades humanas, sino también de las alteraciones climáticas, sobre el bienestar del ecosistema y su población humana. Sustenta una población multiétnica, la cual se ha duplicado de 200,000 personas hasta más de 400,000 en la última década (INE 2009). Esta población depende de las dinámicas del ecosistema de la cuenca para garantizar la provisión de agua para consumo y producción alimenticia, atractivo turístico, pesca, medio de transporte, y bosques para leña, la estabilización de las pendientes, y la generación de agua, entre otros. Dentro de este contexto, el significado espiritual del lago y su contribución al bienestar humano es de alta importancia. Es patrimonio natural y cultural, tanto nacional como mundial. Científicamente, ha sido caso clásico de un lago oligotrófico (Weiss 1971; Brezonik & Fox 1974).

La salud ambiental es clave para el desarrollo y la estabilidad de las comunidades de la Cuenca del Lago Atitlán y el Departamento de Sololá. Por lo tanto, un entendimiento de su estado actual y sus dinámicas es importante, ya que el lago es fuente de agua para consumo humano; cuatro municipios reciben un porcentaje de su agua directamente de él, con una potabilización mínima: Santiago Atitlán (55%), San Pedro la Laguna (25%), San Lucas Tolimán (95%) y Panajachel (40%) (Romero 2009). Asimismo, la pesca es importante en muchos de los pueblos, incluyendo a Santiago Atitlán, San Lucas Tolimán, San Pedro la Laguna y San Juan la Laguna, no solamente para peces sino también para el cangrejo endémico, *Potamocarcinus guatemalensis*. Sin embargo, desde el establecimiento de poblaciones humanas en sus alrededores, el lago ha recibido de los pueblos, en cantidades crecientes, los desechos y aguas residuales casi sin tratamiento, lo que contribuye a aumentar los niveles de nutrientes presentes en sus aguas e impacta a la salud humana y los peces.

Con esto en mente y tomando en cuenta las señales claras de un deterioro del ecosistema durante los últimos 52 años, tales como un aumento en niveles de nutrientes, el apareamiento de cianobacteria, la introducción de por lo menos 12 especies exóticas de peces y macrófitas, la extinción del pato poc, *Podylimbus gigas*, y el avance de la frontera agrícola (Deevey 1957; Weiss 1971; Dix *et al.* 2003; Castellanos y Dix 2009; Rejmánková *et al.* 2011), la Universidad del Valle (UVG) estableció el Centro de Estudios Atitlán – UVG (CEA-UVG) en su campus Altiplano situado en El Tablón, Sololá, Sololá. El fin es tener en la cuenca del Lago Atitlán un centro capaz de lanzar estudios diversos sobre aspectos ambientales, agrícolas y sociales; implementar técnicas de manejo de desechos y prácticas agrícolas apropiadas para la región; mantener una fuente actualizada de documentación sobre la cuenca; y desarrollar e incorporar programas educativos ambientales a nivel departamental. Por medio de estas acciones se espera involucrar a todos los niveles de la ciudadanía en el buen manejo de su entorno, promover ordenamiento territorial y la búsqueda de soluciones innovadoras para los problemas de la cuenca.

En octubre del 2009, el Lago Atitlán experimentó un florecimiento fuerte de la cianobacteria, *Lyngbya robusta*, en sus aguas, visible por los sistemas satelitales (CATHALAC/NASA/USAID, 2010), y el cual tuvo consecuencias económicas para la población regional, reduciendo en por lo menos el 25% los ingresos proviniendo del turismo, provocando

un desempleo del 25% (A. Rivera *com.pers.*), e impactando severamente a la pesca por temor de la posible presencia de cianotoxinas, entre otros.

En el mundo, se han asociado los florecimientos de cianobacterias con un exceso de fósforo en comparación con el nitrógeno (Schindler 2006; Conley *et al.* 2009; Cabrera y Salazar, 2011; Rejmánková *et al.* 2011). Por otro lado, Istvanovics (2008) señala que el fósforo es el nutriente más frecuentemente involucrado en el control de especies planctónicas que tienen clorofila *a*. El florecimiento de *L. robusta*, especie antes conocida de Brasil (Komárek y Komárková 2007), fue el primero documentado en todo el mundo como causado por esta especie (Rejmánková *et al.* 2011).

El desarrollo de un sistema de monitoreo que permite entender el comportamiento del lago, conocer su estado ambiental y entender los factores que contribuyen a los florecimientos es de suma importancia.

El comportamiento de los parámetros fisicoquímicos en las aguas lacustres controla la producción del fitoplancton y la alimentación de la fauna dentro de la red trófica, por ejemplo: zooplancton, cangrejos, peces, aves, entre otros, dependen del plancton. Asimismo, cuando el lago se estratifica termalmente, con una capa de agua más caliente (el epilimnio) encima de una capa de agua más fría (el hipolimnio), pueden existir concentraciones mayores de nutrientes en las aguas profundas, las cuales no están disponibles para el fitoplancton, el cual se ubica generalmente a profundidades menores de 40 m en la zona de penetración de la luz fotosintética en el Lago Atitlán (Dix *et al.* 2012 a), por encima del hipolimnio. Entre los factores importantes son la transparencia del agua que refleja la penetración de la luz y la concentración de sólidos, incluyendo al plancton, en suspensión; la temperatura, el oxígeno disuelto, iones disueltos tales como especies de nitrógeno (nitros, nitritos, amonio) y fósforo (ortofosfato o fosfato reactivo soluble), las cuales son factores limitantes para los seres vivos. En general, se considera un cociente de N/P soluble entre 7 y 10 ideal para el crecimiento y desarrollo del fitoplancton, si el cociente es menor que 7 indica que el fósforo está en exceso, lo que podría favorecer el crecimiento de *L. robusta* (Dix *et al.* 2012 a). Otros factores, como las densidades poblacionales del plancton, el potencial de hidrógeno (pH), reflejan situaciones relacionadas con la fotosíntesis, la presencia y equilibrio de dióxido de carbono disuelto e iones de carbonatos y bicarbonatos.

En años anteriores, estudios sobre el Lago Atitlán, por lo general, fueron dedicados al análisis de aguas superficiales (el primer metro de profundidad) (Castellanos *et al.* 2002; Castellanos y Girón 2009; Oliva *et al.* 2010, entre otros). Sin embargo, Weiss (1971), en estudios limnológicos entre 1968 y 1970 presentó mediciones a varias profundidades y sugirió que el lago se estratificaba en marzo y se mantenía en este estado hasta principios de diciembre y luego, en un periodo corto, las aguas se mezclaban y se perdía la estratificación dando lugar a condiciones isotérmicas. Weiss también observó que en sus dos años de trabajo hubo diferencias en el comportamiento de las aguas. El estudio PREPAC (2006), el cual abarcó el periodo octubre del 2005 hasta abril del 2006 indica que el lago estaba estratificado en octubre, noviembre y abril, lo que sugiere que hubo un volteo en diciembre del 2005. Carecemos aún de información accesible, actualizada sobre el comportamiento, circulación y las mezclas de las aguas tanto superficiales como de profundidades, a lo largo del año. Contar con esta información basada en un sistema de monitoreo ayudaría en entender el comportamiento de las cianobacterias productoras de



Gráfica 1. Ubicación de sitios principales de muestreo Lago Atilán, octubre 2009 hasta diciembre 2011. Fuente: Google Earth ©; Laboratorio de Análisis y Monitoreo, CEA

florecimientos en el lago y sobre cambios en la llegada y la disponibilidad de nutrientes.

Como bioindicadores, las especies de plancton proporcionan información a largo plazo sobre el impacto humano en un ecosistema; su densidad y composición relativa reflejan la calidad del agua sobre tiempo y permiten medir respuestas a cambios ambientales. La mayoría de los lagos experimentan cambios estacionales tanto de densidad como de abundancia relativa de diferentes especies. Para el Lago Atilán, se cuenta con información esporádica sobre el plancton (Clark 1908; Deevey 1957; Weiss 1971; Dix *et al* 2003; PREPAC 2006; Castellanos y Dix, 2009). Sin embargo, lo conocido sobre cambios estacionales en densidad y abundancia relativa es escasa. Es importante poder contar con esta información y correlacionarla con los niveles de nutrientes principales, tales como nitrógeno y fósforo, para poder desarrollar modelos predictivos en cuanto a las dinámicas del plancton.

En 1968/69, Weiss (1971) no detectó cianobacterias en el lago Atilán. Sin embargo, en 1976, la cianobacteria, *Microcystis* sp, ya estaba presente (Dix *et al*. 2003). La densidad relativa de éste aumentó progresivamente entre las décadas 80 y 90 hasta llegar a una densidad relativa del 50% del total en noviembre 1992 y 1998 (Dix *et al* 2003). Entre los años 2007 a 2009 empezaron a aparecer señales alarmantes del deterioro del ecosistema acuático con apariciones cada vez mayor de la cianobacteria filamentososa, *L. robusta*, entre octubre y diciembre y el florecimiento del 2009 llegó a cubrir el 40% de la superficie del lago en Noviembre (CATHALAC/NASA/USAID, 2010). Castellanos y Dix (2009) establecieron una línea base para la condición del lago para el mes de marzo, 2009. Para mayores detalles de los estudios realizados se sugiere consultar a Dix *et al*. (2012a y 2012b).

Esperamos que este artículo, no solo contribuye al mejor entendimiento del lago como un sistema dinámico sino también subraya la necesidad urgente de dedicar esfuerzos a disminuir, por todos los métodos posibles, la cantidad de nitrógeno y fósforo que llega al lago.

Métodos

- **Sitios y frecuencia de muestreo:** A finales del año 2009, se escogieron cinco sitios representativos del lago: frente a cuatro pueblos: Santiago Atilán, San Pedro la Laguna, Panajachel y San Lucas Tolimán, los cuales reciben un porcentaje apreciable de su agua para consumo humano del lago (Romero 2009) y representan diferentes condiciones de viento, bahías, entrada de ríos y nutrientes; El Centro-Weiss G, con una profundidad mayor de 300 m, es un punto de referencia del cual existe información desde 1968 (Weiss 1971). Estos puntos han sido estudiados por diferentes proyectos y es posible comparar la información de este estudio con datos anteriores. En junio del 2010, con el fin de empezar a entender mejor el comportamiento de la zona litoral del lago, se agregó un punto de muestreo poco profundo, la Bahía de San Buenaventura. La Gráfica 1 demuestra la ubicación de estos puntos. Rutinariamente, se realizaron muestreos una vez al mes a profundidades hasta 100m. Durante las expediciones científicas, en abril, junio, agosto y diciembre del 2010 se tomaron muestras a profundidades mayores de 100 m. En algunos meses no fue posible llegar a todos los puntos por mal tiempo, en especial por los vientos fuertes típicos de la época fría, los cuales generaron olas grandes. En el presente documento, se usa resultados para el Centro Weiss-G como representativo del comportamiento de los factores analizados.

- **Parámetros fisicoquímicos in situ:** Se tomaron perfiles verticales de oxígeno disuelto, temperatura, conductividad y conductividad específica con la ayuda de un medidor marca: YSI 51B, 82 o, 85, o Hydrolab Minisonde 4, según su disponibilidad. El pH fue medido con un potenciómetro. La transparencia de la columna de agua fue determinada con un disco Secchi de 20 cm. de diámetro.

- **Nutrientes:** Se tomaron las muestras en frascos de HDPE previamente lavados con una solución de ácido clorhídrico de 0.1 N en agua desmineralizada. Las muestras de agua fueron



Gráfica 2. El centro del Lago Atilán, 10 de junio 2010, con troncos y detritos llevados por la Tormenta Agatha, concentrados dentro de un giro.

colectadas por medio de una botella de Van Dorn a varias profundidades en los sitios indicados en la Gráfica 1. Cuando hubo cantidades apreciables de detritos, como plásticos, madera y piezas de pómez, las muestras fueron filtradas con una malla de mesh 80 μm , para evitar interferencia en el análisis. Posteriormente, las muestras fueron almacenadas a 4°C en hieleras con hielo y refrigeradas en el laboratorio hasta su procesamiento. Si el análisis iba tardar más de 48 horas las muestras fueron congeladas.

• **Análisis químico de laboratorio:** Para el análisis de amoníaco ($\text{NH}_4\text{-N}$), nitrato + nitrito ($[\text{NO}_3\text{-} + \text{NO}_2\text{-}]\text{-N}$) y fósforo reactivo soluble ($\text{PO}_{4.3}\text{-P}$), las muestras fueron filtradas con filtros GF/F (Whatman®) de 0.45 μm el día de colecta. Para $\text{NH}_4\text{+}$ se usó el método de indofenol (Liddicoat et al. 1975; Solórzano 1969) con análisis dentro de 24 horas, para $\text{NO}_3\text{-}$ se usó el método de hidrazina (Eaton et al. 2005; Kamphake et al. 1967) y para $\text{PO}_{4.3}$ el método de ácido ascórbico (Murphy y Riley, 1962). Las lecturas fueron realizadas con un espectrofotómetro (Shimatsu, Genesis 20). Para determinar, en el 2010, la concentración de la clorofila "a", un volumen de 180 mL de agua de cada muestra fue filtrada con un filtro (GF/F) de 0.45 μm (Whatman®), el filtro se congeló y almacenó para su análisis fluorométrico siguiendo el método descrito en Eaton et al. (2005).

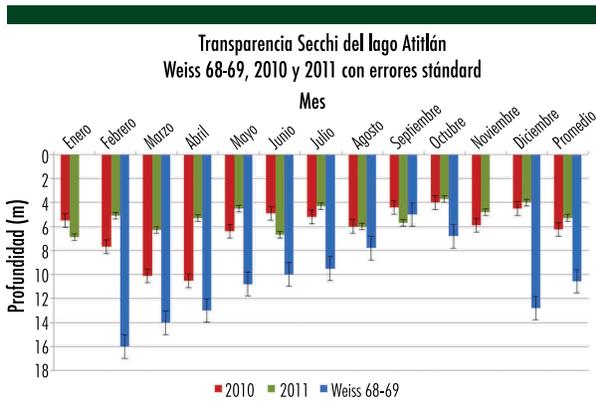
• **Plancton: Métodos de recolecta:** Para el análisis cuantitativo, las muestras fueron colectadas a profundidades especificadas con el uso de una botella de Van Dorn en los sitios indicados en el Cuadro 1. Cada muestra se subdividió en dos submuestras de un volumen conocido (entre 250 y 1000 ml); una fue fijada con una solución de Lugol para obtener una concentración final del 2% y la otra con formol para obtener una concentración final del 10% (4% formaldehído). Los recipientes que se utilizaron fueron previamente preparados en el laboratorio con el volumen requerido de la solución fijador. Para el análisis cualitativo, se realizaron jaladas verticales de 10 m y 20 m, cuando fue posible hasta 40 m o más, con una red de arrastre de plancton de 30 cm de diámetro, un metro de largo y mesh de 80 μm . Las muestras colectadas de fitoplancton fueron fijadas con Lugol o con formol como se describe anteriormente. Además se mantuvo viva una parte de las muestras de cada estación para poder examinarla y fotografiarla en el laboratorio. Estas muestras fueron usadas únicamente para obtener una idea rápida sobre cuales especies estaban presentes en el plancton

y su profundidad aproximada. Cada recipiente con Lugol fue forrado con papel aluminio para evitar que la luz degradase la acción del fijador. Cada muestra colectada, tanto para análisis cuantitativo como para cualitativo, se protegió de la radiación solar almacenándose dentro de una caja oscura o una hielera.

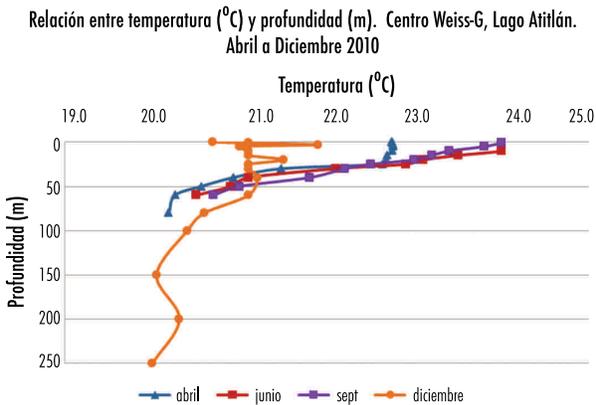
• **Análisis cuantitativo de laboratorio:** Cada muestra cuantitativa en Lugol o en formol fue filtrada por gravedad usando papel filtro analítico fino y luego re-suspendida en 10 ml de solución. Para el conteo de fitoplancton se tomó un 1 ml de la muestra re-suspendida en una celda Sedgwick Rafter y se contó el volumen necesario (entre 0.2 y 0.5 ml) para obtener por lo menos 100 individuos. Esto fue repetido 3 veces. En el caso de organismos que tienden a formar colonia, tales como las diatomeas *Fragilaria crotonensis* y *Aulacoseira* spp., las cianobacterias *Microcystis* spp. y el alga verde *Sphaerocystis* sp., cada colonia fue contada como un organismo. En el caso de *L. robusta*, que forma filamentos de diferentes largos pero de ancho constante, se anotó el largo del filamento para después poder estimar el número de células. Se subdividieron los filamentos entre pequeños (menores de 100 células), medianos (entre 100 y 300 células) y grandes (más de 300 células). Esta subdivisión nos permitió determinar rápidamente el estado de reproducción y madurez de la *Lyngbya*. Los géneros y especies fueron identificados usando como referencias: Smith 1950; Prescott 1970; Wehr y Sheath 2007; Komárek y Hauer 2004 al 2010; Edlund et al. 2010, Oyadomari 2010; Dix, 1977 a 2010.

Resultados

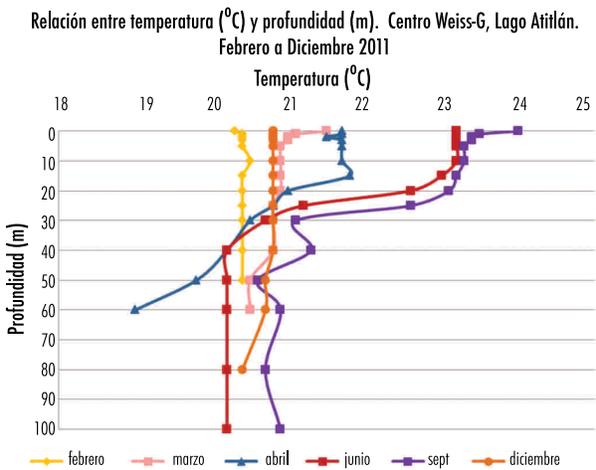
• **El clima en 2009 a 2011:** Empezando con la tormenta tropical Agatha, 28 y 29 de mayo, el año 2010 fue notable por tormentas continuas. En Santiago Atilán, la precipitación llegó a un total de 2,715 mm para el año, lo que sobrepasa por más de 1,000 mm a los niveles mayores reportados desde 1990, 1,705 mm en 2005, 1,629 mm en 1995 para Santiago Atilán (INSIVUMEH, 2012), y hasta agosto del 2010 el nivel del agua en el lago había subido por lo menos 2.75 m (observaciones personales), inundando a cultivos e infraestructura cercana a las orillas, y recuperando áreas que habían estado sumergidas tiempo atrás. En 2011, la precipitación en Santiago Atilán llegó a 2,037 mm, todavía mayor que lo del 2005, lo que contribuyó a mantener niveles altos del agua. La depresión 12E, del 8 al 12 octubre del 2011 dejó 238.7 mm de lluvia en El Tablón,



Gráfica 3. Transparencia Secchi del Lago Atitlán, 1968 – 69, 2010 y 2011, con errores estándares de los promedios.



Gráfica 4. Relación entre temperatura (°C) y profundidad (m). Centro Weiss-G, Lago Atitlán. Abril a Diciembre 2010.



Gráfica 5. Relación entre temperatura (°C) y profundidad (m), Centro Weiss-G, Lago Atitlán. Febrero a Diciembre 2011.

Sololá (datos UVG). Tomando el área del lago como 122.34 Km², cifra medida por CATHALAC para 2009 (CATHALAC 2011), y la subida de nivel a finales de agosto como 2.75 m, se calculó que hasta agosto del 2010 se había agregado por lo menos 336 millones de m³ de agua al volumen del lago. En la Gráfica 2, se observa la acumulación de detritos, piedra pómez, ramas y materia vegetal en el centro del lago, donde existe un giro demostrado en las fotos satelitales analizadas

para cianobacterias por CATHALAC. Este fenómeno podrá ser importante en la proliferación selectiva de diferentes especies de fitoplancton, ya que ahí se concentrarán, por ejemplo, filamentos de *Lyngbya*.

Factores físico-químicos

• **Transparencia Secchi:** La Gráfica 3 demuestra los promedios mensuales de las lecturas Secchi obtenidos durante el periodo de estudio, así como el promedio obtenido por Weiss en 1968/69 para los mismos puntos. (En este análisis solo se compararon 5 puntos iguales a los de Weiss, omitiendo a San Buenaventura. Así mismo no se tomaron en cuenta la infomación de Weiss si no representaba los 5 puntos (meses de noviembre y enero)). La gráfica demuestra una reducción en transparencia entre 1968/69 y 2010/2011. El análisis de varianza (ANDEVA) correspondiente indica que existe diferencia significativa entre los datos reportados por Weiss (1971) y los del presente estudio: La probabilidad estimada por el método fue < 0.005 , lo cual es significativamente menor al estadístico de prueba *alfa* de 0.05 ($0.005 < 0.05$) (McPherson 2001). Se nota una reducción de la transparencia en el mes de junio 2010, después de la tormenta Agatha, probablemente debido al aumento en sedimentos en suspensión provenientes de la erosión y escurrimiento. De manera similar, la transparencia estuvo baja de septiembre hasta noviembre del 2010, tal vez debido a la erosión en agosto. Durante el 2011, la transparencia no llegó a los niveles observados en abril del 2010, estuvo bajo en los meses de mayor lluvia (septiembre y octubre). El rango de transparencia entre 1.5 y 15.5 m de profundidad indica un lago entre oligotrófico y mesotrófico.

• **Perfiles de temperatura:** La Gráfica 4 presenta la relación entre la profundidad y la temperatura en el Centro Weiss-G para el año 2010 y la gráfica 6 el año 2011. Para 2010 se observa una estratificación clara del lago establecida para abril, con el metalimnio entre 22.5 m y 60 m, temperaturas mayores en junio y septiembre y temperaturas menores en diciembre. En diciembre, se puede ver una pérdida de la estratificación con mezcla parcial de las aguas arriba de 30 m y una curva heterograda a profundidades mayores. La mezcla no esta completa y no existen condiciones isotérmicas desde la superficie hasta el fondo. En 2011, se observa un aumento progresivo en temperatura de las aguas superficiales desde febrero hasta septiembre, temperaturas menores en diciembre, y mínimas en febrero cuando las condiciones parecían isotérmicas hasta una profundidad de 50 m (Gráfica 5). Para marzo se empieza a estratificar pero a diferencia del 2010 no se establece una estratificación térmica clara hasta junio, con el inicio de la termoclina entre 15 y 30 m (un nivel superior a lo encontrado en el 2010). En septiembre, se observa mezclas parciales con discontinuidades a varias profundidades, y condiciones casi isotérmicas hasta 80m para diciembre.

• **Temperaturas superficiales:** Los cuadros 1 y 2 presentan las temperaturas encontradas en 6 mediciones cada mes entre 0 y 10 m de profundidad con los promedios, para los sitios muestreados durante 2010 y 2011 respectivamente.

La temperatura máxima observada durante el año 2010 fue de 25.7°C en junio en el Centro Weiss-G a 1m de profundidad (Cuadro 1) y la mínima de 20°C a 5 y 10 m en Panajachel en octubre (Cuadro 1). El promedio anual máximo fue de 23.4°C en San Pedro la Laguna, y el mínimo fue de 21.2°C en el Centro

Cuadro 1. Temperaturas mínimas y máximas de 0 a 10m, Lago Atitlán 2010

Sitio	Temp (°C)	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Dic.	Promedio anual
San Pedro	Min	21.3	21.7	22.4	---	23.7	21.1	22.8	22.5	22.5	22.0	21.8	22.2
	Max	21.4	22	23	---	25.3	25.5	23	24.0	24	23.8	22.2	23.4
San Lucas	Min	21.3	21.6	22.9	20.2	23.7	20.5	22.8	23.9	---	21.0	20.5	21.8
	Max	21.4	22.4	23.2	22.7	24	23.5	23	23.7	---	22.1	20.7	22.7
Centro	Min	21.3	22.0	23.4	20.2	24.1	20.5	20.5	20.4	20.1	20.5	20.1	21.2
	Max	21.6	22.4	23.6	22.8	25.7	24	23.2	23.8	24	23	21.3	23.2
Santiago	Min	21.0	21.8	22.8	---	23.9	20.1	21.0	21.0	21.8	20.2	20.7	21.4
	Max	21.1	22.4	23.3	---	24.3	23.9	23.3	23.4	23.5	20.4	21.1	22.7
Panajachel	Min	21.2	22.5	24.0	---	23.9	23.0	20.8	21.3	23.0	20.0	21.0	22.1
	Max	21.5	23.1	23.2	---	25.2	25	23.7	23.65	24.5	22.2	21.1	23.3

Cuadro 2. Temperaturas mínimas y máximas, de 0 a 10m, Lago Atitlán 2011

Sitio	Temp (°C)	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic	Promedio anual
San Buenaventura	Min	21.8	20.5	21.1	22.0	23.4	23.1	23.9	23.9	24.5	22.4	22.5	20.4	22.6
	Max	22	21.5	21.2	23	23.6	23.3	25	24.3	24.9	22.6	22.9	20.8	22.9
San Pedro	Min	19.6	20.5	20.5	20.2	20.8	20.4	20.9	21.5	21.0	20.7	21.5		20.7
	Max	20.8	21	21.3	22.6	23.7	23.7	25	24	23.7	23.5	22.6		22.9
San Lucas	Min		20.1	20.7	19.0	20.2		20.2	21.7	20.7	19.8	20.2		20.3
	Max		20.3	21.3	21.9	22.8		23	23.4	23.1	22.3	22		22.2
Centro	Min		20.3	20.5	19.8	19.9	20.2	20.2	21.0	20.6	20.5	20.2	20.4	20.3
	Max		20.4	21.5	21.8	23.3	23.2	24	23.8	24	23	22.1	20.8	22.7
Santiago	Min	20.2		20.2		21.0	22.8	20.5		21.2	22.0	20.5		21.1
	Max	20.6		21.1		22.8	23.2	23.3		23.6	22.8	22		22.4
Panajachel	Min		20.3	19.5	21.0	20.2	20.8	20.0	20.5	20.2	20.5	20.2	20.3	20.3
	Max		23	21	22.9	23.4	23.2	23.9	24	23.2	22.4	22.1	20.7	22.7

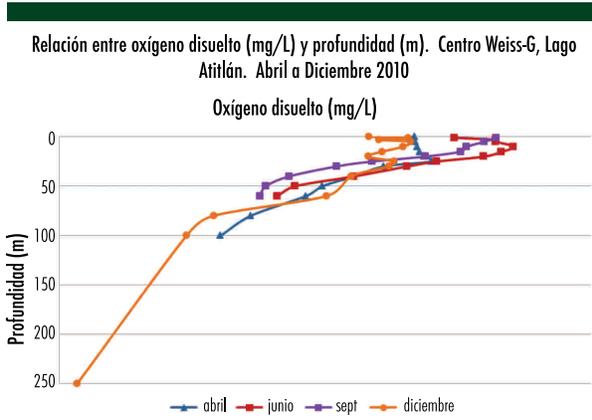
Weiss-G. El rango promedio entre los sitios era de 1.3°C. Para 2011 (Cuadro 2), la temperatura mínima fue de 19°C en San Lucas Tolimán en abril y la máxima fue de 25°C en San Buenaventura en julio. El promedio máximo anual por sitio fue de 22.9°C para San Buenaventura y San Pedro la Laguna, el promedio mínimo anual por sitio fue de 20.3°C en San Lucas Tolimán, el Centro Weiss-G y Panajachel. El rango promedio entre los sitios, excluyendo a San Buenaventura, era de 2.0°C. En San Buenaventura, sitio de menos de 7 m de profundidad en donde las aguas son mezcladas constantemente por los vientos, el rango promedio fue solamente 0.3°C.

• **Oxígeno disuelto:** Para las temperaturas encontradas en el Lago Atitlán con una elevación de 1,565 msnm, el rango de saturación de oxígeno es entre 7.1 mg / L a 20° C y 8.4 mg / L a 25° C. Dado que las condiciones de temperatura y densidad del plancton, productor y consumidor de oxígeno, son variables durante el año no se puede hablar de concentraciones esperadas. Si existe un florecimiento habrá 100% o más de saturación. Para el fondo se considera que mediciones de 2mg / Lo menos indican condiciones hipoxias.

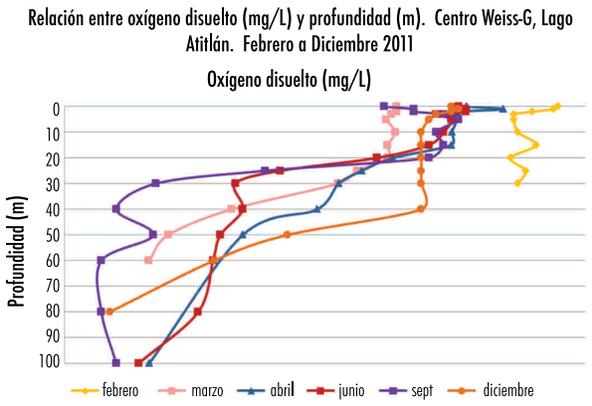
• **Capas Superficiales:** En general, las concentraciones de oxígeno disuelto por mes (6 mediciones entre 0 y 10 m) y sitio entre octubre de 2009 y diciembre de 2010 para profundidades de 1, 5, y 10 m fueron menores entre marzo y mayo. A estas profundidades, los valores del oxígeno disuelto observados tenían un mínimo de 2.9 mg/L en Panajachel en octubre del 2009 y un máximo de 8.7 mg/L (> de 100% de saturación) en

San Pedro en diciembre del 2009 a 1 y 5 m de la superficie durante un florecimiento de *L. robusta* (Dix et al. 2012a y b). El promedio mensual mayor hasta 10 m de profundidad para todos los sitios fue de 7.6 mg/L a 5 m en diciembre 2009. El promedio mensual menor fue de 5.0 mg/L para el mes de mayo de 2010. El sitio con el mayor promedio anual fue San Pedro la Laguna con 6.9 mg/L a 5 m de profundidad, el sitio con menor promedio fue Panajachel con 6.1 mg/L a 10 m (Dix et al. 2012a y b). De manera similar, para 2011, las concentraciones de oxígeno disuelto cerca de la superficie fueron menores en marzo y abril. El valor mayor de 8.6 mg/L (mayor de 100% de saturación) se observó en el Centro Weiss-G en febrero.

• **Estratificación:** En 2010, (Gráfica 6) se observó una estratificación del oxígeno disuelto con un patrón similar a la temperatura para los meses de abril, junio y septiembre. Sin embargo, las mayores concentraciones observadas varían de profundidad con un aumento en concentración a 25 m de profundidad, nivel del metalimnio, para abril; a 10m para junio seguido por un oxiclino hasta 50 m; en septiembre un oxiclino entre 15 y 50 m; y en diciembre un comportamiento errático. Esos cambios 8 posiblemente se relacionan a la mezcla parcial de las aguas. Para 2011, la estratificación del oxígeno disuelto fue claramente definida en marzo y se mantuvo un oxiclino desde marzo a diciembre (Gráfica 7). Para los meses de junio y septiembre hubo aumentos de oxígeno disuelto en el metalimnio, a 40 m y a 50 m respectivamente. Los valores máximos fueron observados en el Centro Weiss-G llegando hasta 7.9 mg/L en abril. En este año también fueron observados con mayor



Gráfica 6. Relación entre oxígeno disuelto (mg/L) y profundidad (m). Centro Weiss-G, Lago Atitlán, abril a diciembre, 2010.



Gráfica 7. Relación entre oxígeno disuelto (mg/L) y profundidad (m), Centro weiss-G, Lago Atitlán, febrero a diciembre, 2011.

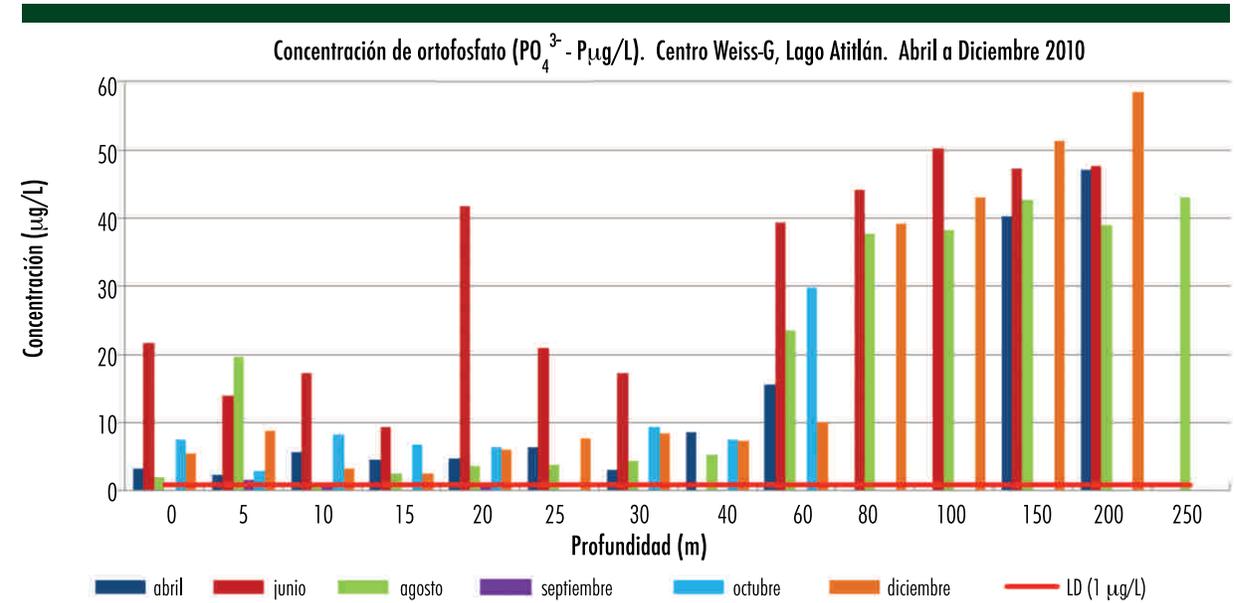
frecuencia condiciones hipóxicas (< 2 mg/L) cerca del fondo en San Lucas Tolimán (febrero, abril y septiembre), Centro (julio

y octubre), Panajachel (noviembre), San Pedro la Laguna (febrero), San Buenaventura (octubre) y Santiago Atitlán (noviembre) (información CEA, no presentado en este documento para los otros sitios).

• **Ortofosfato ($PO_4^{3-}P$):** Las Gráficas 8 y 9 presentan las concentraciones encontradas de ortofosfato (fósforo reactivo soluble) para los años 2010 y 2011 respectivamente. Para 2010, se observaron en el Centro-Weiss G, un quimiocliño con concentraciones generalmente mayores de fósforo reactivo soluble en el hipolimnio, debajo de 50 m, así como un aumento notable en concentración en junio en la mayoría de profundidades (posiblemente debido a la Tormenta Agatha). El valor mayor fue de $58.5 \mu g/L$ en diciembre a 200 m de profundidad (Gráfica 8). Para 2011, Gráfica 9, el comportamiento fue similar con el valor mayor observado de $47.3 \mu g/L$ a 100 m en octubre. En general, las concentraciones en el epilimnio fueron menores de $20 \mu g/L$.

• **Amonio ($NH_4^+ - N$):** Para 2010 (Gráfica 10), el amonio se mantuvo a niveles muy bajas, menores de $10 \mu g/L$. Al contrario, en 2011, fueron encontrados valores mayores de $20 \mu g/L$ en los meses de febrero y abril a profundidades hasta 60 m (Gráfica 11).

• **Nitratos más nitritos ($NO_3^- + NO_2^- - N$):** Las gráficas 12 y 13 presentan las concentraciones encontradas para nitratos/nitritos ($NO_3^- + NO_2^- - N$) en los años 2010 y 2011 respectivamente. En la Gráfica 12, se observa un quimiocliño con concentraciones generalmente bajas (< $40 \mu g/L$) de nitrato/nitrito arriba de 60 m de profundidad, límite inferior del metalimnio, y un aumento rápido hasta $80 \mu g/L$ o más debajo de este nivel. En muchos casos, como en el epilimnio en abril y junio por encima de los 25 m, se observan concentraciones menores de $3 \mu g/L$ (cerca de los límites de detección del método), luego para agosto las concentraciones subieron hasta $33 \mu g/L$. En el hipolimnio, por debajo de los 60 m en adelante, los valores fueron mayores en diciembre, hasta $145 \mu g/L$ a 250 m. En junio, alcanzaron entre 45 y $50 \mu g/L$ a estas profundidades. Para 2011, Gráfica 13, el patrón para nitratos era similar con



Gráfica 8. Concentración de orto-fosfato ($PO_4^{3-} - P$) $\mu g/L$. Centro Weiss-G, Lago Atitlán, abril a diciembre 2010.

Concentración de ortofosfato (PO_4^{3-} -P $\mu\text{g/L}$). Centro Weiss-G, Lago Atitlán. Febrero a Diciembre 2011

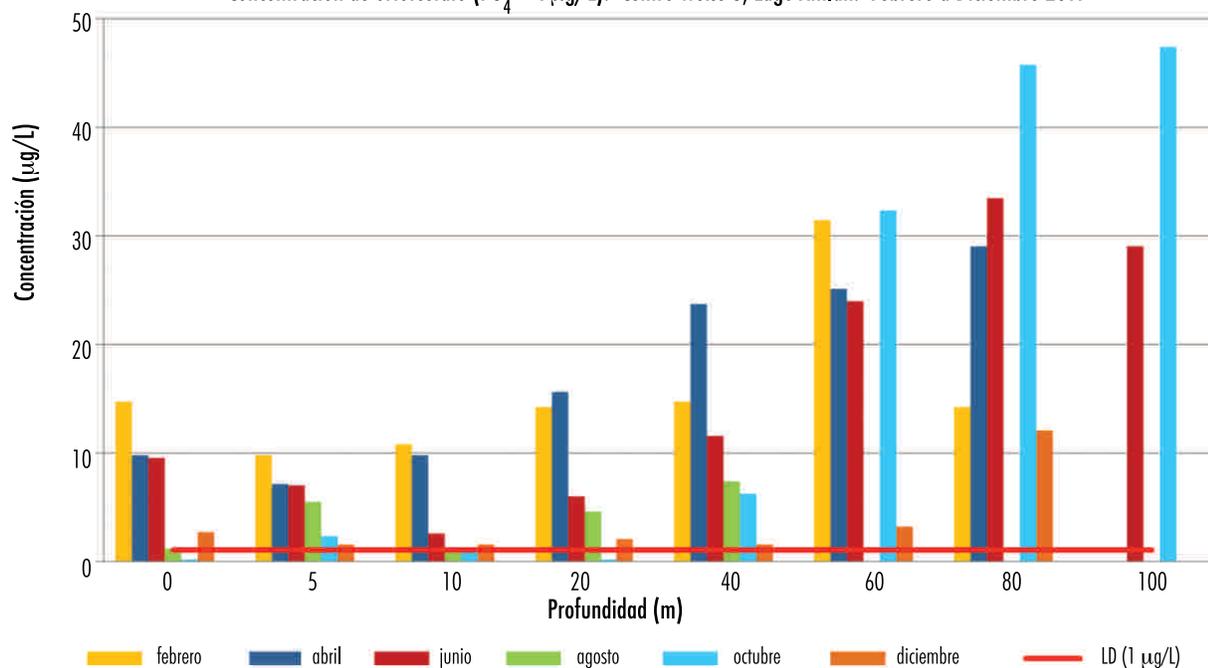


Gráfico 9. Concentración de orto-fosfato (PO_4^{3-} -P $\mu\text{g/L}$). Centro Weiss-G, Lago Atitlán, febrero a diciembre 2011.

Concentración de amonio (NH_4^+ -N $\mu\text{g/L}$). Centro Weiss-G, Lago Atitlán. Abril a Octubre 2010

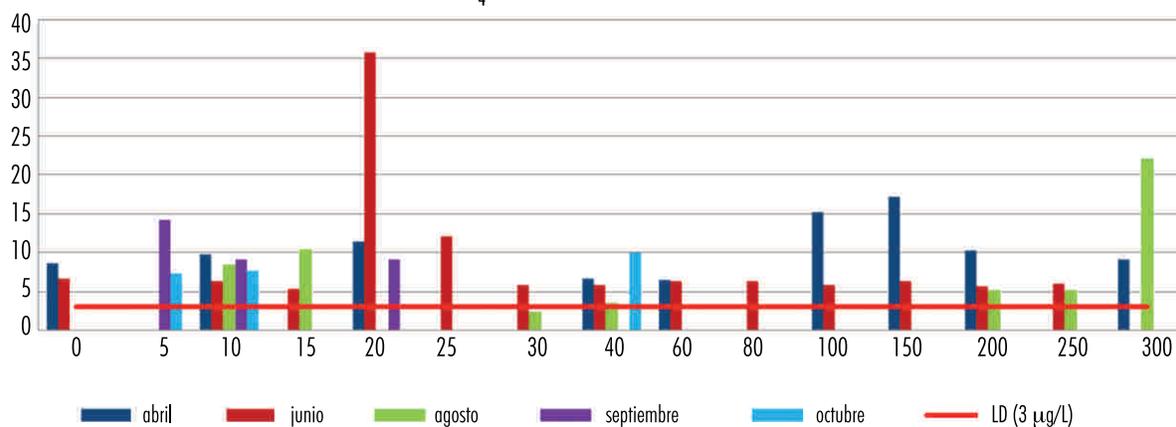


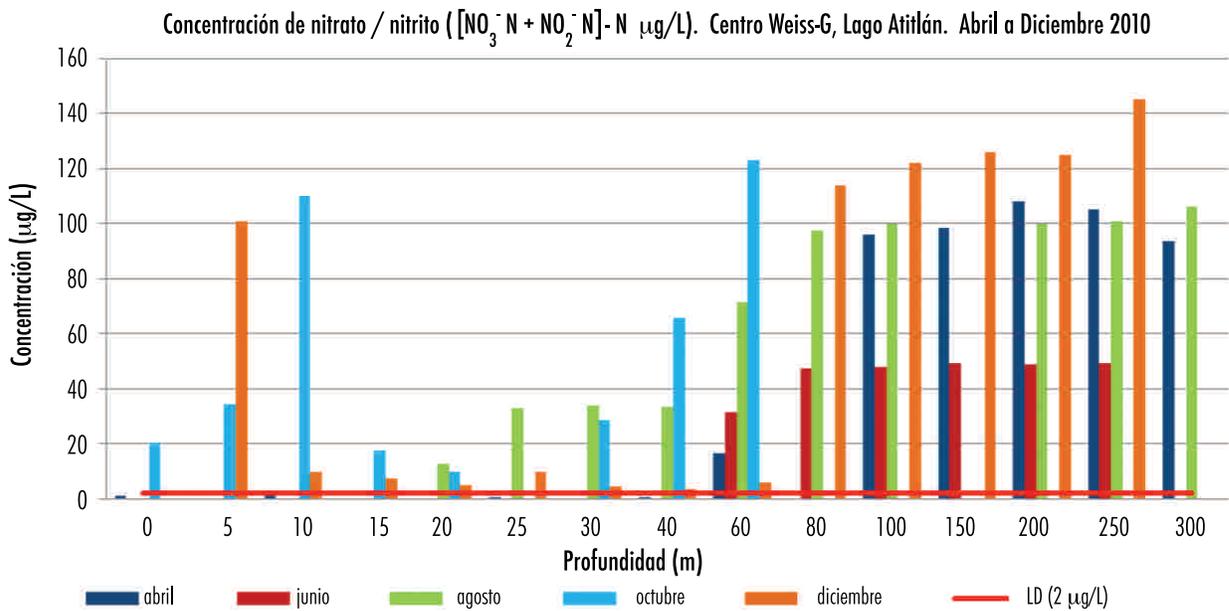
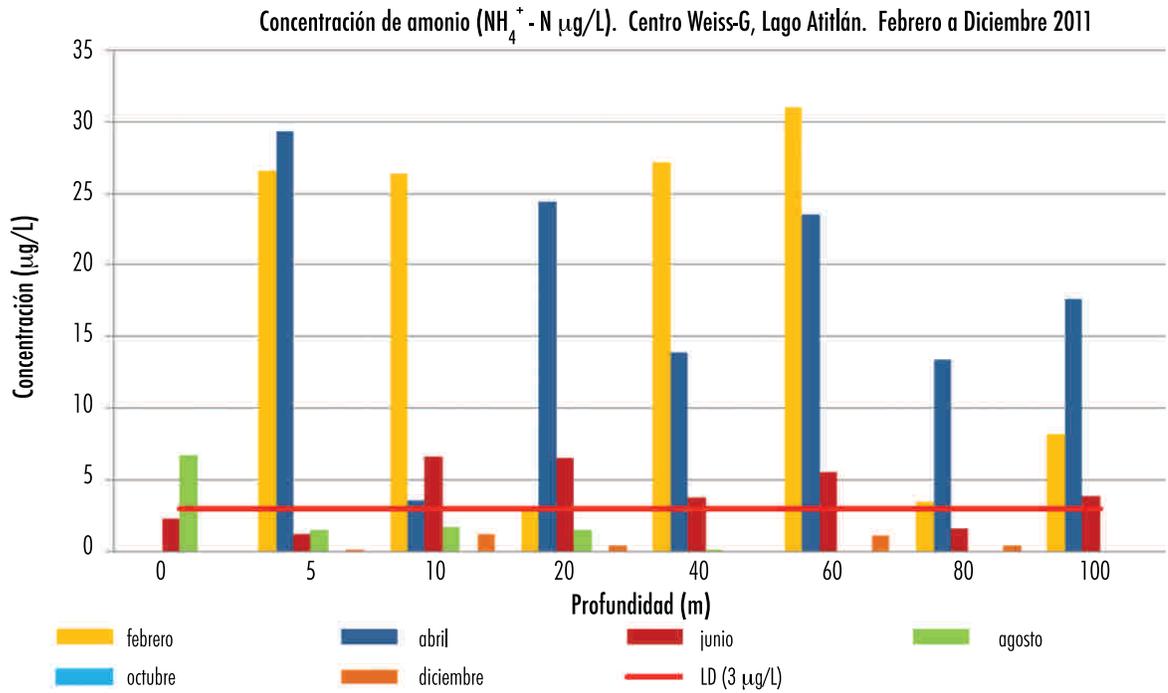
Gráfico 10. Concentración de amonio (NH_4^+ -N $\mu\text{g/L}$). Centro Weiss-G, Lago Atitlán, abril a octubre 2010.

sea a profundidades menores de 40 m de la superficie. Se observa un aumento notable de concentración de nitratos en el hipolimnio en octubre. El valor máximo obtenido fue de 85.1 $\mu\text{g/L}$ a 60 m en octubre.

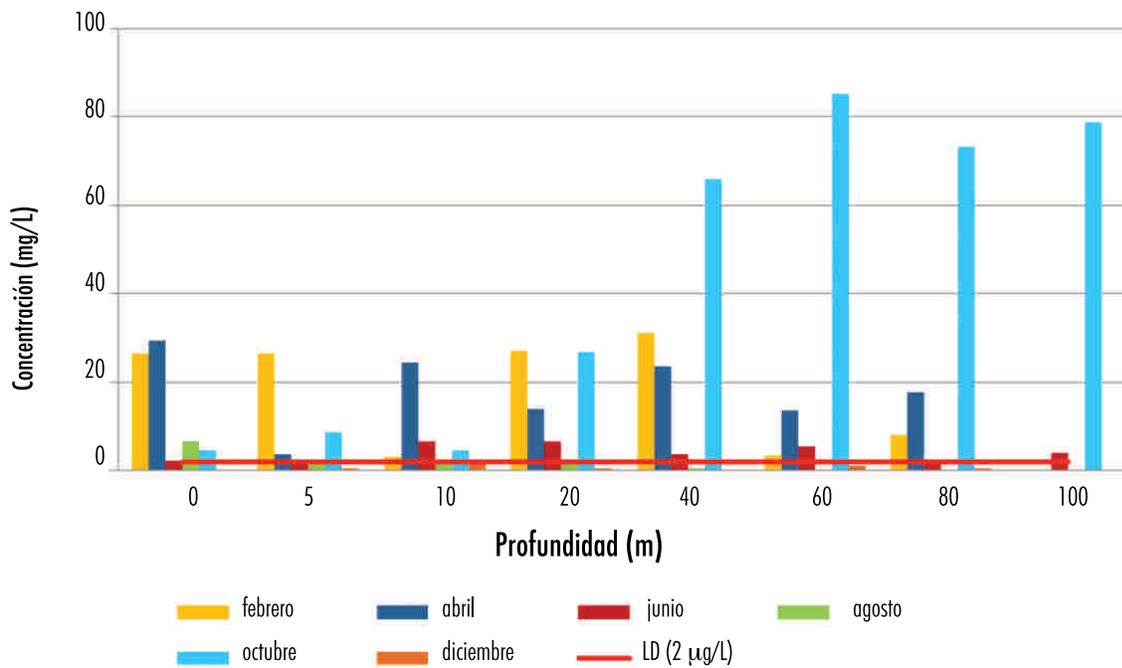
• **Cociente nitrógeno inorgánico soluble ($(\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-) - \text{N}$) / Fósforo reactivo soluble ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$):** La gráfica 14 demuestra el cociente entre nitrógeno inorgánico soluble, $(\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-) - \text{N}$ y fósforo reactivo soluble ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) para el centro Weiss G entre 5 y 40 m de profundidad durante el año 2011. Para los meses de febrero a abril, el cociente era menor de 8, exceptuando un valor de 9 a 5 m en marzo. En mayo no fue posible medir nitratos. De agosto en adelante las razones subieron.

• **Clorofila a:** Las concentraciones de clorofila a para el Centro Weiss-G en el año 2010 se demuestran en la Gráfica 15. La abundancia de la clorofila a es una medida indirecta de la actividad fotosintética del fitoplancton. Sus valores eran mayores arriba de la termoclina, con el mayor valor (2.77 $\mu\text{g/L}$) observada a 30 m en junio, en el metalimnio. Así mismo, se nota que las concentraciones fueron mayores en junio y agosto que en abril. Entre abril y el 10 y el 20 de junio se observó un aumento en valores de clorofila a en profundidades entre 5 y 20 m, el cual es significativo. (ANDEVA con clorofila a como variable dependiente: entre fechas, sig, $p < 0.001$).

• **Fitoplancton:** En esta sección, es importante distinguir entre organismos y células, ya que las algas filamentosas, muchas

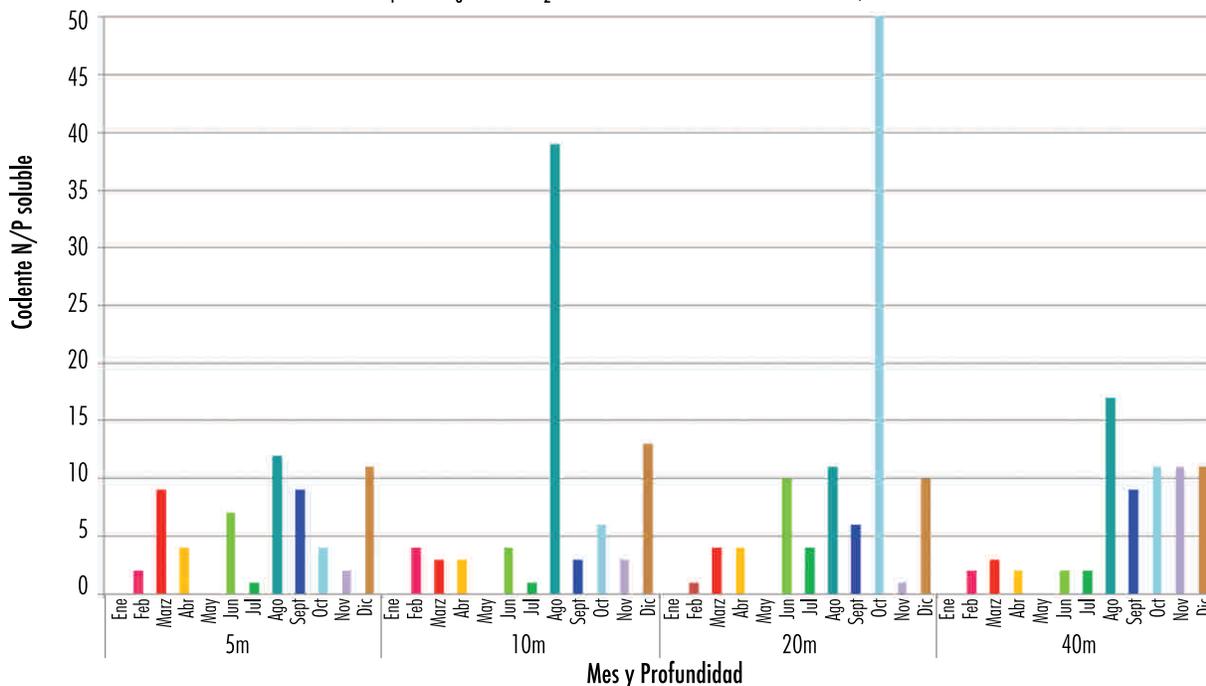


Concentración de nitrato / nitrito ((NO₃⁻ + NO₂⁻) - N) mg/L). Centro Weiss-G, Lago Atitlán. Febrero a Diciembre 2011



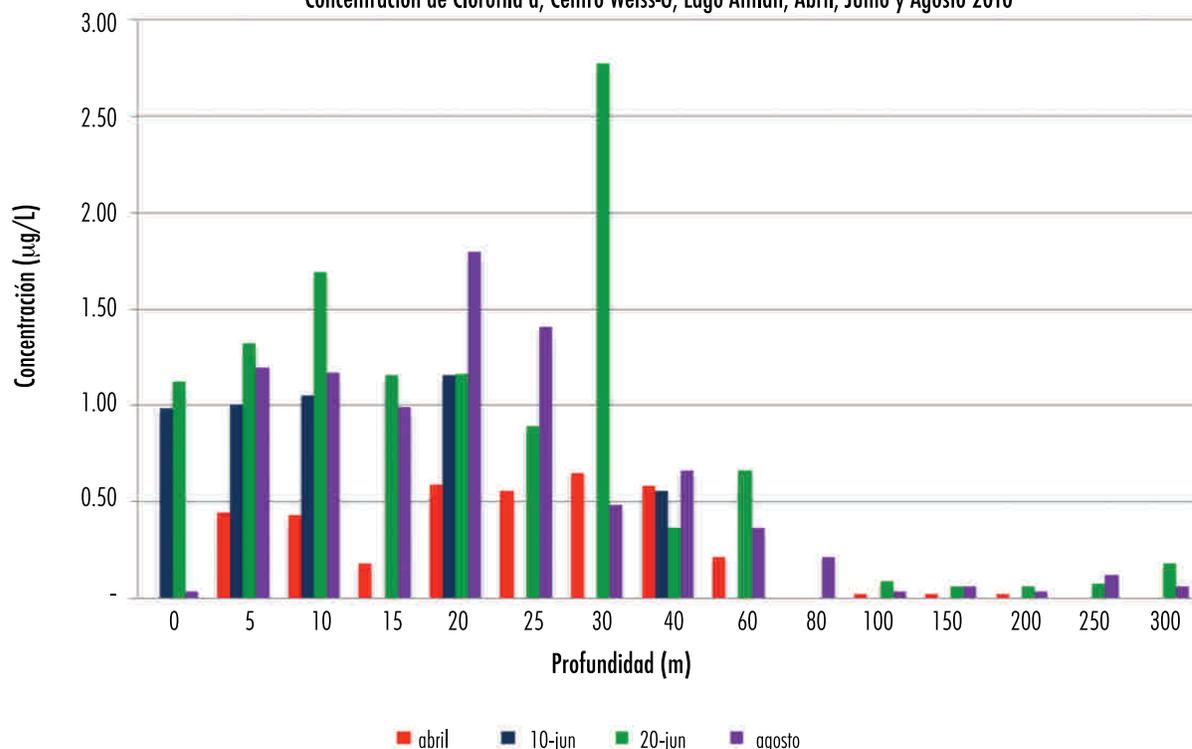
Gráfica 13. Concentración de nitrato/nitrito ((NO₃⁻ + NO₂⁻) - N) µg/L). Centro Weiss-G, Lago Atitlán, febrero a diciembre 2011.

Cociente Nitrógeno Inorgánico disuelto (NH₄⁺ + [NO₃⁻ N/ + NO₂⁻²]- N): Fósforo reactivo disuelto (PO₄³⁻ - P) Centro Weiss-G, Lago Atitlán, 2011



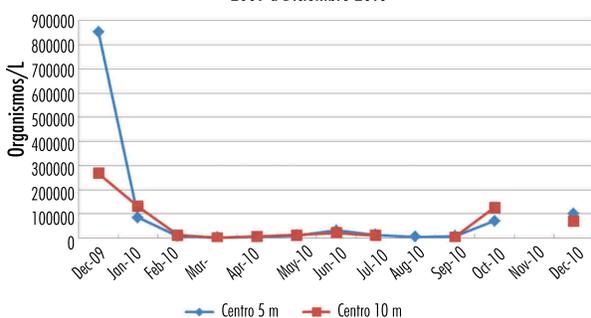
Gráfica 14. Cociente nitrógeno inorgánico disuelto (NH₄⁺ + (NO₃⁻ + NO₂⁻) - N): fósforo reactivo disuelto (PO₄³⁻), Centro Weiss -G, Lago Atitlán, 2011.

Concentración de Clorofila a, Centro Weiss-G, Lago Atitlán, Abril, Junio y Agosto 2010



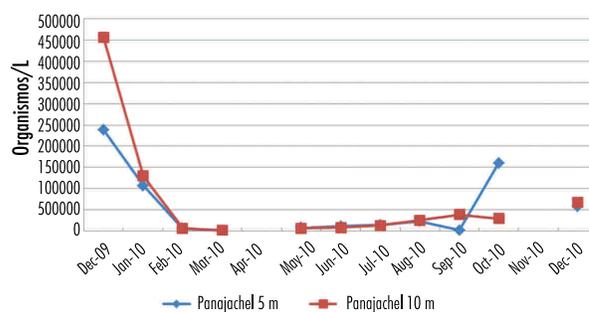
Gráfica 15. Concentración de clorofila a, abril, junio y agosto 2010. Centro-Weiss G. Lago Atitlán.

Densidad de Fitoplancton, 5 y 10 m, Centro Weiss-G, Lago Atitlán, Diciembre 2009 a Diciembre 2010



Gráfica 16a. Densidad de fitoplancton, 5 y 10 m, Centro-Weiss g, Lago Atitlán, diciembre 2009 a diciembre 2010.

Densidad de Fitoplancton, 5 y 10 m, Panajachel, Lago Atitlán, Diciembre 2009 a Diciembre 2010



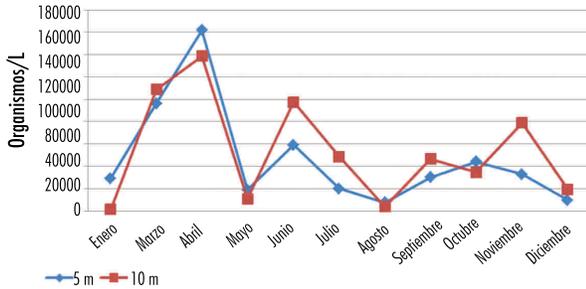
Gráfica 16b. Densidad de fitoplancton, 5 y 10 m, Panajachel, Lago Atitlán, Diciembre 2009 a diciembre 2010.

diatomeas y cianobacterias forman colonias que pueden consistir de cientos de células. Muchas veces es difícil contar células y es costumbre reportar organismos por litro. Sin embargo, la biomasa representada varía mucha entre colonias y entre especies. En este trabajo se decidió trabajar en general a nivel de organismo. En el caso de la cianobacteria, *L. robusta*, para poder lograr una mejor idea de la biomasa relativa involucrada se decidió también determinar el número de células en los filamentos.

• **Densidad de organismos:** Las Gráficas 16a y 16b ilustran la densidad de organismos contados a 5 y 10 m en Centro Weiss-G y Panajachel entre diciembre 2009 y diciembre 2010, se observa un patrón similar en ambas. Las Gráficas 17a y 17b presentan los resultados de conteos a 5 y 10 m en los mismos

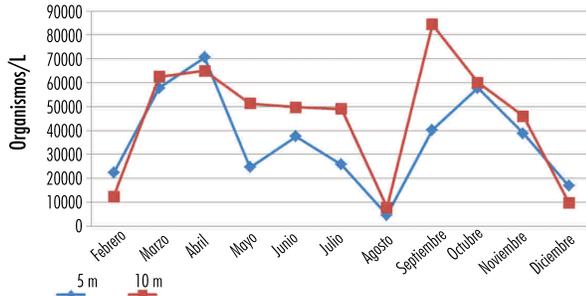
dos sitios para el año 2011. Se observa un comportamiento muy diferente entre los dos años. Entre octubre 2009 y diciembre 2010, la densidad mayor, arriba de 850,000 organismos por litro en el Centro Weiss-G, fue encontrada en diciembre 2009, con la densidad mínima de 1,102 organismos en marzo, en Panajachel (Gráfica 16b) a 10 m. Se notan bajas densidades en agosto a 5 m, ilustrada para el Centro Weiss-G con 5,234 organismos. En septiembre, en Panajachel, a 5 m de profundidad la densidad total de organismos encontrados fue solamente 1,818 organismos por litro. Luego en octubre, las densidades totales empezaron a subir, alcanzando, en el Centro Weiss G, arriba de 126,000 organismos por litro en el Centro Weiss G a 10 m; en diciembre en este sitio, a 5 m de profundidad se contaron 101,030 organismos por litro. Para el año 2011, la

Densidad de Fitoplancton, (organismos/L), 5 y 10 m, Centro Lago Atitlán, febrero a diciembre 2011



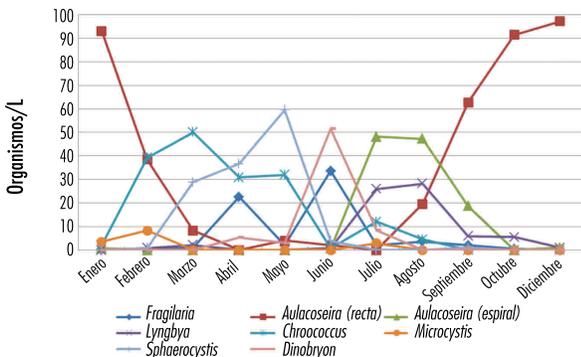
Gráfica 17a. Densidad de fitoplancton (organismos/L), 5 y 10 m, centro Lago Atitlán, febrero a diciembre 2011.

Densidad de Fitoplancton, (organismos/L), 5 y 10 m, Panajachel, Lago Atitlán, febrero a diciembre 2011



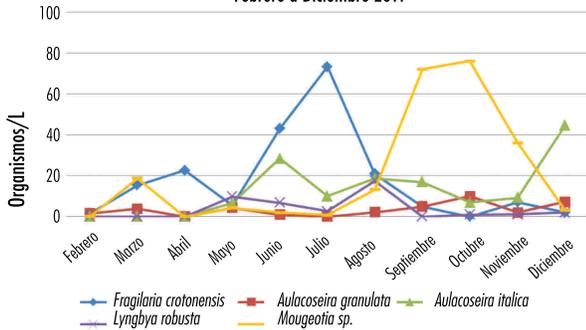
Gráfica 17b. Densidad de fitoplancton (organismos/L), 5 y 10 m, Panajachel, Lago Atitlán, febrero a diciembre 2011.

Densidad de Relativa (%) de Fitoplancton, 5 m, Centro Weiss-G, Lago Atitlán, Enero a Diciembre 2010



Gráfica 18a. Densidad relativa (%) de fitoplancton, 5 m, Centro Weiss G, Lago Atitlán, enero a diciembre 2010.

Densidad de Relativa (%) de Fitoplancton, 5 m, Centro Weiss-G, Lago Atitlán, Febrero a Diciembre 2011



Gráfica 18b. Densidad relativa (%) de fitoplancton, Centro Weiss G, Lago Atitlán, febrero a diciembre 2011.

densidad máxima fue observada en abril con 162, 000 organismos por litro en el Centro Weiss-G a 5 m (Gráfica 17a) y, de manera similar al 2010, la mínima ocurrió en agosto en ambos sitios con conteos entre 3,800 organismos por litro (Centro a 10 m, Gráfica 17a) y 7,800 organismos por litro a 10 m en Panajachel (Gráfica 19b). Sin embargo, la máxima densidad para Panajachel fue encontrada en septiembre (84,000 organismos por litro a 10 m de profundidad), mes en donde, en 2010, ocurrió la densidad mínima.

• **Densidad relativa del fitoplancton:** La Gráfica 18a ilustra la densidad relativa en % de los organismos de fitoplancton encontrados a 5 m en el Centro Weiss-G durante el 2010, la gráfica 18b demuestra lo observado en 2011. Los organismos predominantes en 2010 fueron las diatomeas, *Aulacoseira granulata* (recta) (Gráfica 19), *A. itálica* (espiral) (Gráfica 20), y *Fragilaria crotonensis* (Gráfica 20); el dinoflagelado, *Ceratium hirudinella* (Gráfica 20); el alga verde, *Sphaerocystis*; el alga parda (Pyrrhophyta), *Dinobryon divergens* (Gráfica 21); y las cianobacterias, *L. robusta* (filamentosa) (Gráficas 19 y 22), *Microcystis aeruginosa* (Gráfica 19) y *M. cf. bothrys* (ambas coloniales), y *Chroococcus* (coccoide). En 2011, los organismos predominantes fueron similares con la excepción de la disminución en densidad de *Sphaerocystis* y *D. divergens*. Como se observa en las Gráficas 18a y 18b, hubo cambios estacionales en las densidades relativas de diferentes géneros durante años y entre años. El año 2010 empezó con una predominancia de *A. granulata* (recta) (Gráfica 18a); en marzo, esta fue remplazada por *Sphaerocystis* y *Chroococcus*, géneros de biomasa pequeña; de nuevo en julio y agosto, *Aulacoseira*, esta vez *A. itálica* (espiral) (Gráfica 20), aumentó su densidad y, para los últimos 4 meses del año, *A. granulata* (recta) representaba 60% o más de la población total. En 2011 (Gráfica 18b), la dominancia de *A. granulata* (recta) y *A. itálica* (espiral) disminuyó llegando a un máximo de 45% para *A. itálica* (espiral) en diciembre 2011, mientras que en 2010 fue *A. granulata* (recta) que dominó con una densidad relativa mayor del 90%, en enero, octubre y diciembre. *Sphaerocystis* y *D. divergens*, así como *Microcystis* spp. fueron más escasas. El año fue notable por la alta abundancia relativa de la alga verde filamentosa, *Mougeotia* sp., la cual prefiere aguas más ricas en nutrientes, llegó a una abundancia relativa del 76% y fue dominante entre septiembre y noviembre. Esta especie fue observada por primera vez en el plancton en diciembre del 2010. Al mismo tiempo, se empezó a notar la presencia de *Staurastrum planctonicum*, *Bothryococcus braunii*, *Pediastrum simplex* y *P. boryanum*, lo que sugiere cambios en condiciones del agua hacia un estado más mesotrófico (corroborado por J. Komarek). *Asterionella formosa*, abundante en 2003 y abril del 2010, desapareció de las muestras.

• **Cianobacterias:** Las cianobacterias, representadas por los géneros *Lyngbya*, *Microcystis* y *Chroococcus*, también presentaron variaciones en sus densidades relativas, como organismos, durante los años. La Gráfica 18a demuestra que, del inicio del año 2010 hasta junio, *L. robusta* mantuvo densidades coloniales relativamente bajas, con un máximo de 2.1% en marzo; en julio cuando su contribución al total era mayor del 25%, lo cual se mantuvo hasta agosto y luego bajó hasta 5% a 6% en septiembre y octubre meses cuando las hormogonia (formas reproductivas) predominaban y filamentos largos eran escasos. (En septiembre dominó la diatomea, *A. itálica* (espiral)). *Microcystis* fue representada por dos especies, *M. cf. bothrys* y *M. aeruginosa* (Gráfica 19). Su mayor densidad relativa (8.2%) se observó en



Gráfica 19. Fotografía (100 X) de fitoplancton, noviembre 2010 demostrando dominancia de Aulacoseira forma recta y presencia de dos filamentos gruesos de Lyngbya robusta (izquierda) y Microcystis aeruginosa (derecha). (Foto: Michael Dix)



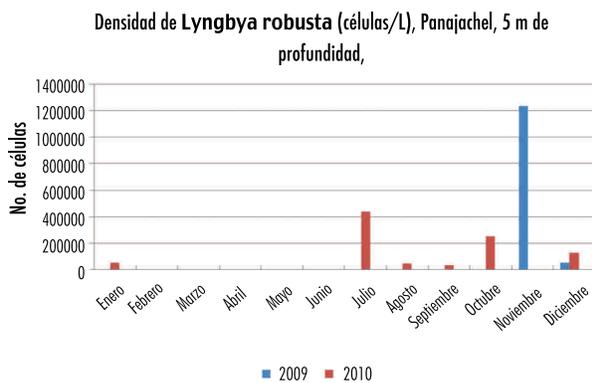
Gráfica 20. Fotografía (400 X) de la diatomea, *Fragilaria crotonensis*, dominando el fitoplancton en abril 2010, con el dinoflagelado, *Ceratium hirudinella*, y Aulacoseira forma "espiral" (puntero). (Foto: Margaret Dix)



Gráfica 21. Fotografía (400X) de *Dinobryon* sp, un alga parda (Chrysophyta), Lago Atitlán, 2010. (Cortesía de La Autoridad de Manejo Sustentable de La Cuenca del Lago de Amatitlán, -AMSA-).



Gráfica 22. Fotografía (400x) de *L. robusta* en reproducción. Foto: Michael Dix.



Gráfica 23. Densidad de *Lyngbya robusta* (células / L), Panajachel, 5 m de profundidad, noviembre 2009 a diciembre 2010.

abril 2010. El género, *Chroococcus*, un organismo pequeño, tuvo su mayor densidad relativa del 50 % entre los meses de febrero y abril del 2010 (Gráfica 18b). La Gráfica 23 demuestra el número de células de *Lyngbya* encontradas en Panajachel a 5 m de profundidad entre octubre 2009 y diciembre 2010. Se nota que la mayor concentración de más de 1, 200,000 células por litro fue obtenido en noviembre 2009. A 30 cm, en Panajachel en noviembre 2009, el conteo fue de 5,160,000 células de *Lyngbya*. Durante todo el año 2010 la densidad máxima encontrada fue menor a 900,000 células por litro en el Centro Weiss-G en julio, 2010. El Cuadro 3 demuestra los resultados de conteos del número de células de *L. robusta* por litro durante 2011 en el Centro Weiss G y Panajachel a 0.5 y 10 m de profundidad. Únicamente en mayo aparecieron densidades indicadores de florecimiento con 3, 342, 000 células por litro en la superficie en el Centro Weiss-G. Durante marzo

Cuadro 3. Densidad células de *Lyngbya robusta* por litro, Lago Atitlán 2011

a. Centro Weiss-G										
Profundidad	Feb.	Mayo	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	
0m		3,341,969		2,474	204	1,200	0	1,200	0	
5m		487,047	839,120	535	306	0	442	679	204	
10m	95,785	78,788	877,193	2,232	271	842	336	2,344	410	

b. Panajachel										
Profundidad	Feb.	Abr.	Mayo	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
0m			317,460		1,469	641	1,252	0	992	0
5m			270,833	375,738	2,000	612	403	1,143	1,619	851
10m			952,614	640,394	1,429	1,000	0	0	914	103

Cuadro 4. Parámetros usados para la clasificación trófica de lagos (basada en Wetzel 2001, adaptada de Vollenweider) y situación del Lago Atitlán (presente estudio).

Parámetro	Valor estadístico	Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico	Lago Atitlán (2010 al 2011)
Fósforo total ($\mu\text{g/L}$)	Promedio	8	26.7	84.4	
	Rango	3.0 - 17.7	10.9 - 95.6	16 - 386	30 - 37
Nitrógeno total ($\mu\text{g/L}$)	Promedio	661	753	1875	
	Rango	307 - 1360	361 - 1387	393 - 1690	129 - 152
Clorofila α ($\mu\text{g/L}$)	Promedio	1.7	4.7	14.3	
	Rango	0.3 - 4.5	3 - 11	3 - 78	0 - 2.77
Profundidad	Promedio	9.9	4.2	2.45	
Disco Secchi (m)	Rango	5.4 - 28.3	1.5 - 8.1	0.8 - 7.0	6.1 - 7.2

y abril no se observó células de *L. robusta* en las muestras cuantitativas, aunque fueron presentes en cantidades mínimas en jaladas verticales.

Discusión de resultados y conclusiones

La transparencia del lago durante el periodo, octubre de 2009 hasta diciembre de 2011) tuvo un rango absoluto de 1.5 m hasta 15.5 m. Entre febrero 2010 y diciembre 2011, los valores promedio variaban desde un máximo por sitio de 10.5 m en abril 2010 y un mínimo de 3.7 m en octubre, 2011. Estos valores son significativamente menores de los reportados por Weiss indicando un deterioro en la transparencia del agua (Gráfica 3). En 2011, no se logró una transparencia igual a lo observado en 2010. Este rango indica un lago entre oligotrófico y mesotrófico.

Las temperaturas superficiales tuvieron un rango entre 19.5°C en enero 2011 y 25.5°C en junio 2010 (Cuadros 1 y 2). En 2010 (Gráfica 4), el lago estaba estratificado termalmente en abril 2010, hubo mezclas parciales entre junio y octubre y el volteo de las aguas estaba casi completo para diciembre. Sin embargo, en Centro-Weiss G la mezcla aun era incompleta debajo de 80 m. El metalimnio se ubicó entre 25 y 45 m. En 2011 (Gráfica 5), el lago no se estratificó claramente hasta junio y hubo mezclas parciales en septiembre. El metalimnio se ubicó entre 15 y 30m, con su inicio a menor profundidad que en el año 2010. No se puede decir con seguridad si el lago se mezcla completamente en cada año. Para esto es importante tomar mediciones a mayor profundidad durante la época crítica. La intensidad de los vientos es importante: afecta la estratificación y la temperatura y, por crear turbulencia, favorece a diatomeas a fin del año, e inhibe que *L. robusta* se mantenga en las aguas

superficiales (Fogg y Walsby, 1970; Huisman y Hulot 2005). Es importante notar que la estratificación térmica no es estable desde marzo a octubre como se ha sugerido (Romero 2009) sino existen mezclas parciales las cuales pueden influir en la disponibilidad de nutrientes. La estratificación empieza durante el aumento en insolación de marzo/abril antes del inicio de las lluvias.

El oxígeno disuelto presentó un rango de concentración entre 8.7 mg/L hasta 0.3 mg/L (Gráficas 5 y 6). Se notó la presencia de aumentos en concentraciones de oxígeno en el metalimnio, lo que sugiere actividad fotosintética a este nivel, un fenómeno frecuentemente asociado con presencia de cianobacteria (Wetzel 2001). Así mismo fueron observados con mayor frecuencia en 2011 condiciones hipóxicas en el hipolimnio, lo que indica presencia de materia orgánica en descomposición y la falta de una mezcla completa del lago o por lo menos una des-estratificación parcial en estas épocas.

Los nutrientes principales en solución amonio (Gráficas 10 y 11), nitratos/nitritos (Gráficas 12 y 13) y fosfato (Gráficas 8 y 9), tuvieron niveles bajos en los primeros diez metros de profundidad, en donde la demanda por nutrientes por la actividad del fitoplancton era mayor; las concentraciones se incrementaron en el hipolimnio donde no hay fotosíntesis. En el año 2010 hubo aumentos claros de ortofosfato (Gráfica 8) en junio, después de la tormenta Agatha, lo que sugiere una mayor entrada de fósforo soluble. Para 2011 los niveles observados eran similares, pero con aumentos notables de fósforo soluble y de nitratos en octubre, especialmente a profundidades mayores y después de la Depresión 12E (238mm de lluvia en 4 días).

El cociente entre nitrógeno inorgánico soluble ($(\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-) - \text{N}$) y fósforo soluble reactivo ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) era baja, menor de 8, tanto en 2010 (Dix *et al.* 2012 a) como en

2011 (Gráfica 14). En 2011 subió arriba de 7 en agosto. Los cocientes bajos, < 7 , indicadores de exceso de fósforo en el agua, favorecen el crecimiento de cianobacteria fijadores de nitrógeno, tal como *L. robusta*. Sin embargo, se necesita también por lo menos $8 \mu\text{g/L}$ de $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ para que funcionen las nitrogenasas responsables por la fijación del nitrógeno (Díaz et al. 2007). En abril del 2011 se dieron estas condiciones (Gráficas 11 y 16) lo que podría haber contribuido, en conjunto con otros factores, al florecimiento corto observado en mayo. En junio los valores del ortofosfato se habían reducido, posiblemente consumido por la cianobacteria.

Las concentraciones de clorofila *a* (Gráfica 15), medidas solamente durante 2010, eran entre $0.98 \mu\text{g/L}$ y $2.77 \mu\text{g/L}$ durante junio para el Centro del Lago, con un máximo en el metalimnio donde, en periodos de estratificación térmica, se acumulan materia orgánica y nutrientes. Los rangos obtenidos corresponden a un lago oligotrófico.

El estado trófico ha sido usado como concepto organizador para permitir comparar el funcionamiento y estructura de ecosistemas lacustres (Carlson y Simpson 1996). Tiene aplicación en sistemas de clasificación y manejo de lagos y trata de explicar la ubicación de un cuerpo acuático dentro de un continuo de productividad desde oligotrófico hasta eutrófico. El concepto originalmente se basó en la condición biológica de un lago, determinada por su capacidad de fotosíntesis, la cual se deriva de factores, tales como nutrientes, temperatura, luz, pH y turbiedad, que pueden ser limitantes para el proceso. El Cuadro 4 presenta los parámetros usados para tratar de clasificar lagos en términos tróficos (basado en Wetzel (2001, modificado de Vollenweider) y lo indicado por nuestros resultados (clorofila *l* y transparencia Secchi) y datos para nitrógeno y fósforo totales proporcionados por E. Rejmánková (comm. pers.). Las cifras usadas son del epilimnio región productiva del lago.

Los valores obtenidos durante el año 2010 para transparencia Secchi (promedios entre 6.1 y 7.2m), sugieren un lago oligotrófica con tendencia en dirección mesotrófico, los valores de clorofila *a*, entre 0 y $2.77 \mu\text{g/L}$ y para nitrógeno total (129 a $152 \mu\text{g/L}$) ubican al lago Atitlán dentro del rango oligotrófico. Los niveles de fósforo total (entre 30 y $37 \mu\text{g/L}$) están dentro del rango mesotrófico (Cuadro 4). Se concluye que, según la información disponible después de dos años de estudios, el lago tiene un estado trófico ente oligotrófico y mesotrófico y se nota que el nivel de fósforo total es el más elevado de los factores medidos. Estos resultados indican que en promedio, dado el exceso relativo de fósforo, el lago esta limitado por nitrógeno, lo que favorece a especies de fitoplancton, como *L. robusta*, capaces de fijar nitrógeno.

Entre los dos años, el fitoplancton se comportó de manera diferente, llegando a su máxima densidad en diferentes épocas, en diciembre 2009 y en abril 2011. Las densidades mínimas fueron observadas en marzo 2010 y para ambos años en agosto, un mes con baja transparencia.

Hubo cambios mayores en la comunidad de especies de fitoplancton con la desaparición de algunas especies y un aumento de otras. Las diferencias observadas sugieren un cambio de condiciones ecológicas hacía un lago más mesotrófico. Las poblaciones mayores de *L. robusta*, la cianobacteria causante del florecimiento notorio en octubre 2009 (1.2 millones de células/L), fueron observadas en el centro del lago en agosto 2010, y luego fueron desplazadas por la diatomea, *Aulacoseira granulata*. En el año 2010, no fueron observadas concentraciones que cumplen con las definiciones para un florecimiento, sin

embargo se observó un florecimiento breve en mayo del 2011, con una densidad de 3.3 millones de células cerca de la superficie (Cuadro 3). La presencia de *Microcystis aeruginosa* sigue siendo preocupante ya que es capaz de producir toxinas y es notorio por sus florecimientos en el Lago Amatitlán, documentados desde 1898 (Meek, 1908).

Se concluye que el lago esta demostrando cambios ecológicos relacionados con una disminución de la transparencia del agua, aumentos en niveles de nutrientes, aumento en productividad, lo que provoca cambios en las especies presentes las cuales sirven como bio-indicadores del estado trófico del lago. Se sugiere que para inhibir mayor deterioro es necesario limitar la entrada de nitrógeno y fósforo por medio de tratamiento de aguas residuales así como la introducción de métodos innovadores como humedales artificiales. Asimismo es importante conocer mejor las contribuciones de la erosión y el escurrimiento agrícola para poder tomar las decisiones apropiadas.

Agradecimientos

Agradecemos a La Universidad del Valle, en especial su Rector, Roberto Moreno, por autorizar el financiamiento inicial durante el año 2010. Al Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) por proveer recursos para iniciar el seguimiento desde octubre hasta diciembre del 2009: en especial se reconoce la ayuda de Luis Ferrate, Enma Diaz y Nadia Mijangos en los momentos necesarios.

La Agencia para el Desarrollo Internacional de los Estados Unidos de América (USAID) proporcionó apoyo financiero para la compra de equipo básico (ASHA) y logístico para las expediciones científicas. El Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y El Caribe (CATHALAC) desarrolló las imágenes satelitales presentadas. El Consejo Nacional de Áreas Protegidas (CONAP), la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago Atitlán y su Entorno (AMSCLAE) apoyaron en el desarrollo de actividades.

El Cuerpo de Paz autorizó la colaboración de su voluntaria, Erin Michelle Symonds desde diciembre 2009 hasta diciembre 2010 y, Atit-ála facilitó esta colaboración; Iván Azurdia aportó apoyo logístico al inicio de los trabajos; Amigos del Lago, Todos por el Lago y Alberto Rivera dieron apoyo financiero y logístico para las expediciones científicas; Vivamos Mejor y CONRED prestaron una lancha; Hotel Jardines del Lago y Hotel Atitlán permitieron el uso de sus muelles; Porta Hotel, Posada de Don Rodrigo, Hotel Atitlán, Hotel San Buenaventura y Reserva Natural de Atitlán dieron alojamiento en diferentes fechas durante las expediciones científicas del 2010.

Un apoyo financiero, proporcionado por el *National Science Foundation* (NSF) Grant No. 0940796 a Eliska Rejmánková, permitió la colaboración internacional y la capacitación de estudiantes y profesionales guatemaltecos, tanto en Guatemala como en *Castle Lake*, California en 2010.

Agradecemos al personal de la UVG Altiplano por su apoyo. César Ramos, así como los alumnos de la UVG Altiplano, M. Cano, W. Cúmez, T. Estrada, E. Martínez, G. Yataz, L. Méndez, D. Cotí, G. Higüeros y V. Chumil fueron de gran ayuda en los muestreos y trabajos de laboratorio.

El Departamento de Biología y su directora, Margarita Palmieri; el Centro de Estudios Ambientales, su director Edwin Castellanos, Lourdes Figueroa y el laboratorio de SIG; Joel González de la bodega de biología; Leonor de Tott fueron claves para poder lograr muestreos seguidos. Carlos Rolz y a los

demás miembros del comité científico del Lago Atitlán fueron una fuente de estímulo intelectual y observaciones puntuales.

Gracias a nuestros aliados y colegas de los Estados Unidos, E. Rejmánková, S. Chandra, E. Carlson, A. Heyvaert, J. Corman, sus colegas y alumnos; de la República Checa, Jarka Komárek, Jiri Komárek y Jana Veselá, por sus consejos, compañerismo y préstamo de equipo. Nancy Girón, de la Universidad Rafael Landívar, dio apoyo incondicional durante todo el proceso.

David Tax, de la Naviera Gómez, Juan Gabriel Cuc de la lancha Gaby, muchas gracias.

Finalmente, agradecemos a las comunidades de Sololá por confiar en nosotros.

Bibliografía

- Brezonik PL, JL Fox (1974) *The limnology of selected Guatemalan lakes* Hydrobiol. **45**: 467-487
- Brownell MJ, VJ Harwood, RC Kurz, SM McQuaig, J Lukasik, TM Scott (2007) *Confirmation of putative stormwater impact on water quality at a Florida beach by microbial source tracking methods and structure of indicator organism populations* Water Res. **41**:3747-3757
- Cabrera D, C Salazar (2011) *Evaluación de la relación entre las densidades poblacionales de cianobacterias y las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos nitratos y fosfatos en el lago de Amatitlán, Guatemala, durante los meses de mayo a octubre de 2009* Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Escuela de Biología, Universidad de San Carlos de Guatemala
- Carlson RE, J Simpson (1996) *A coordinator's guide to volunteer lake monitoring methods* North American Lake Management Society, USA
- Castellanos E, N. Girón de Masaya, M Álvarez de Mejía, M López, M España (2002) *Calidad de agua del Lago de Atitlán, Guatemala* Universidad del Valle de Guatemala -UVG-, Asociación Vivamos Mejor, Consejo Nacional de Áreas Protegidas -CONAP, The Nature Conservancy -TNC-
- Castellanos E, N Girón (2009) *Calidad microbiológica del agua del Lago Atitlán para los años 2001 - 2006* Revista Universidad del Valle de Guatemala No. 19: 36-44
- Castellanos E, M Dix (2009) *UVG. Levantamiento de la línea base del Lago de Atitlán Marzo de 2009*, Presentado al Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, República de Guatemala
- CATHALAC/NASA/USAID (2010) *Imágenes del florecimiento de la cianobacteria en el Lago Atitlán* http://www.servir.net/an%C3%A1lisis_del_lago_atitl%C3%A1n_con_im%C3%A1genes_de_alta_resoluci%C3%B3n_espacial_para_el_a%C3%B1o_2010
- Clark HW (1908) *The holophytic plankton of Lakes Atitlán and Amatitlán, Guatemala* Proc. Biol. Soc. Wash. **21**:91-106
- CONAMA (1989) *Acuerdo Gubernativo 60-89. Reglamento de requisitos mínimos y sus límites máximos permisibles para la descarga de agua servidas* Guatemala
- CONAP (2007) *Plan maestro de la reserva de usos múltiples cuenca del Lago de Atitlán* Documento Técnico 56 (04-2007) Consejo Nacional de Áreas Protegidas
- Conley DJ, HW Paerl, RW Howarth, DF Boesch, SP Seitzinger, HE Havens, C Lancelot, GE Likens, (2009) *Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus* Science **223**: 114-115
- Corman JR, S Chandra, C Davis, M Dix, N Girón, E Rejmánková, A Roegner, J Vesela JJ Elser (2010) *Ecosystem effects of cultural eutrophication in a large, tropical lake*. Poster presentation at the Fall 2010 American Geophysical Union (AGU) Annual Meeting, San Francisco, CA, USA, 13 - 17 December
- Deevey Jr. ES (1957) *Limnologic studies in Middle America* Transac. Connecticut Acad. Arts Sci. **39**: 213-328
- Díaz M, F Pedrozo, C Reynolds, P. Temporetti (2007) *Chemical composition and the nitrogen-regulated trophic state of Patagonian lakes* Limnol. **37**: 17-27
- Dix MA, I Fortín, O Medinilla (2003) *Diagnóstico ecológico social en la cuenca de Atitlán TNC, UVG*
- Dix MA (1977-2010) *Identificación del plancton. Hojas de trabajo correspondientes al curso de Ecología Acuática* Universidad del Valle de Guatemala
- Dix M, M. Dix, E Symonds, D Cabrera, A Toledo, M. Orozco (2012a) *El Estado físico, químico y biológico del Lago Atitlán. Octubre 2009 a diciembre 2010*
- Dix M; M Dix, E Symonds, D Cabrera, M Orozco, A Toledo, E Bocel (2012b) *El Lago Atitlán: su estado ecológico Octubre 2009 a diciembre 2010*
- Eaton AD (2005) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* 1st ed. American Public Health Association, Washington, DC
- Edlund M, E Stoermer, N Soninkhishig N (2010) *Mongolian Diatom Home Page* University of Michigan-Flint. <http://www.umich.edu/~mongolia/checkimage.html>

- Fogg GE, AE Walsby (1970) *Buoyancy regulation and the growth of planktonic bluegreen algae* Mitt Internat. Verein Limnol. **19**:182-188
- Huisman J, FD Hulot (2005) *Population dynamics of harmful cyanobacteria* p. 143 - 176 en Huisman *et al.*
- Instituto Nacional de Estadística (INE) (2009) Guatemala
- Instituto de Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) (2012) Estadísticas climatológicas
- Istvanovics V (2008) *The role of biota in shaping the phosphorus cycle in lakes* Freshwater Rev. **1**: 13-174
- Kamphake LJ, SA Hannah, JM Cohen (1967) *Automated analysis for nitrate by hydrazine reduction*. Water Res. **1**:205-216
- Komárek J, T Hauer (2004-2010) *The on-line database of cyanobacterial genera* University of South Bohemia and Academy of Sciences of the Czech Republic <http://www.cyanodb.cz/>
- Komárek J, J Komárková-Legnerová (2009) *Several rare freshwater planktic cyanobacteria (Cyanoprokaryotes) from reservoirs in South America* Hoehnea **34**: 49-58
- Liddicoat ML, S Tibbits, El Butler (1975) *The determination of ammonia in seawater* Limnol. Oceanogr. **20**:131-132
- McPherson G. (2001) *Applying and Interpreting Statistics A Comprehensive guide* 2 ed. Springer
- Meek SE (1908) *The zoology of Lakes Amatitlán and Atitlán, Guatemala, with special reference to ichthyology* Field Columbian Museum, Publ. 127; Zool. Ser. 7 (6): 159-206
- Murphy J, JP Riley (1962) *A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters* Anal. Chim. Acta **27**: 31-36
- Oliva B, F Pérez, M del Cid, I Gaitán, B Valladares, F Martínez, E Hernández (2010) *Estudio de contaminantes ecológicos en agua y organismos acuáticos del Lago de Atitlán* Dirección General de Investigación, Universidad de San Carlos
- Oyadomari J (2010) *Freshwater Algae (and Protozoans) of the Keweenaw Peninsula, MI* Finlandia University and Michigan Technological University <http://www.keweenawalgae.mtu.edu/>
- PREPAC (2006) *Caracterización del Lago de Atitlán con énfasis en la pesca y la acuicultura* Guatemala: Proyecto Plan Regional de Pesca y Acuicultura Continental -PREPAC-(OSPECA/TAIWAN/OIRSA)
- Prescott GW (1970) *How to know the freshwater algae* Dubuque, Brown
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo Humano (PNUD) (2008) *Informe Nacional de Desarrollo Humano 2007/2008* Vol. II
- Rejmánková E, J Komárek, MA Dix, J Komárková, N Girón (2011) *Cyanobacterial blooms in Lake Atitlán, Guatemala* Limnol. **41**:296-302.
- Romero M (2009) *Valoración económica del Lago de Atitlán, Sololá, Guatemala* Tesis, Facultad de Agronomía, de la Universidad de San Carlos de Guatemala, Maestría en Ciencias y Manejo Sostenible de Suelo y Agua con especialidad en Planificación y Manejo de Recursos Hídricos
- Smith G (1950) *The fresh-water algae of the United States* McGraw-Hill
- Solórzano, L (1969) *Determination of ammonia in natural waters by the phenol hypochlorite method* Limnol. Oceanogr. **14**:799-801
- Wehr JD, RG Sheath (2003) *Freshwater Algae of North America Ecology and Classification* Academic Press
- Weiss CM (1971) *Water quality investigations in Guatemala. Lake Atitlán 1968-1970* University of North Carolina and ERIS
- Wetzel RG (2001) *Limnology* 3rd ed. Academic Press

(de izquierda a derecha)

Michael Dix

michaelwdix@gmail.com

Margaret Dix

margaret.dix@uvg.gmail.com

Melissa Orozco

meli.oro@gmail.com

Estuardo Bocel

estuardobpj@gmail.com



Erin Symonds

erin.symonds@gmail.com



David Cabrera

destuardo.cd@gmail.com



Alicia Toledo

ma_alicia23@hotmail.com