

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ciencias y Humanidades



Dinámicas de fitoplancton y su relación con factores
físicoquímicos en el centro-Weiss G, Lago Atitlán desde abril 2010
hasta abril 2012

Trabajo de graduación presentado por María Alicia Toledo Lemus, para optar al grado
académico de Licenciada en Bioquímica y Microbiología

Guatemala
2013

Dinámicas de fitoplancton y su relación con factores
físicoquímicos en el centro-Weiss G, Lago Atitlán desde abril 2010
hasta abril 2012

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ciencias y Humanidades

Dinámicas de fitoplancton y su relación con factores
físicoquímicos en el centro-Weiss G, Lago Atitlán desde abril 2010
hasta abril 2012

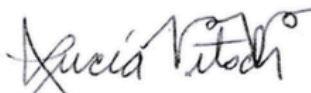
Trabajo de graduación presentado por María Alicia Toledo Lemus, para optar al grado
académico de Licenciada en Bioquímica y Microbiología

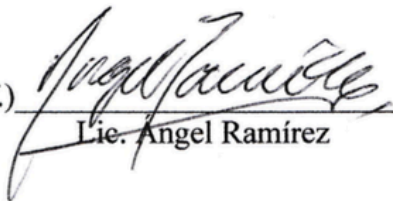
Guatemala
2013

Vo.Bo.

(f.) 
Dra. Margaret Dix

Tribunal

(f.) 
M.A. Lucía Nitsch

(f.) 
Lic. Angel Ramirez

(f.) 
Dra. Margaret Dix

Fecha de aprobación: Guatemala, 3 de enero del 2013.

AGRADECIMIENTOS

A mis papás y José Alejandro por su apoyo incondicional; a la Dra. Margaret Dix por haber creído en mí desde un inicio, por haber estado siempre dispuesta a ayudarme y por sus valiosas enseñanzas; al Dr. Michael Dix por su apoyo incondicional durante todo el desarrollo del proyecto; al Lic. Ángel Ramírez, por su guía en los análisis químicos, a la Licda. Ana Luisa Mendizábal, por su apoyo en los análisis de cuantificación de clorofila y fósforo total, a la Dra. Krisitna Ríos, por su apoyo en la estandarización de los métodos utilizados; al Lic. Andrés Ávalos y al Lic. Enio Cano por su ayuda en los análisis de datos, a Don Joel González de la bodega del Departamento de Biología de la Universidad del Valle de Guatemala, por haber estado siempre dispuesto a ayudarme y muy especialmente a la Licda. Margarita Palmieri por su invaluable apoyo en el préstamo de equipos y laboratorios para llevar a cabo lo análisis correspondientes.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	i
CONTENIDO	ii
LISTADO DE CUADROS	iv
LISTADO DE FIGURAS	v
RESUMEN	vii
I. INTRODUCCIÓN	1
A. Antecedentes	1
1. Los lagos	1
2. Características fisicoquímicas	4
3. Fitoplancton..	17
4. Lago de Atitlán y estudios previos en Guatemala	22
B. Justificación	26
C. Objetivos	27
1. Objetivo general	27
2. Objetivos específicos	27
D. Hipótesis	28
1. Investigación	28
2. Nula	28
3. Alternativa	28
II. MARCO METODOLÓGICO	29
A. Procedimientos	29
1. Descripción del área de estudio	29
2. Análisis de ortofosfato, nitratos, nitritos, amonio y transparencia.	30

3. Toma de muestras	31
4. Análisis de fósforo total.....	31
5. Análisis de clorofila.....	32
6. Análisis de fitoplancton	33
B. Análisis estadístico.....	34
1. Regresión lineal múltiple	34
2. Regresión lineal simple.....	34
3. Análisis del estado trófico del Lago Atitlán	34
III. RESULTADOS	36
IV. DISCUSIÓN	48
V. CONCLUSIONES.....	55
VI. RECOMENDACIONES	56
VII. LITERATURA CITADA	57
VIII. ANEXOS.....	66
A. Fotografías del equipo utilizado.....	66
B. Complemento para los protocolos de análisis químicos	68

LISTADO DE CUADROS

Cuadro 1 Relevancia biológica de las diferentes longitudes de onda de la luz	5
Cuadro 2 Distribución relativa de nutrientes en los lagos	13
Cuadro 3 Parámetros fisicoquímicos más significativos para la clasificación del estado trófico de lagos 2004	15
Cuadro 4 Bandas de absorción principales de la clorofila α y los pigmentos accesorios..	20
Cuadro 5 Pigmentos accesorios presentes en las principales divisiones de algas	20
Cuadro 6 Abundancias relativas de los géneros dominantes de fitoplancton durante el período de muestreo en el epilimnio, Lago Atitlán durante el presente período de estudio	36
Cuadro 7 Regresión lineal múltiple entre nutrientes, razón N:P y las densidades de <i>L. robusta</i> , <i>A. granulata</i> , organismos totales y clorofila α en el epilimnio, Lago Atitlán, durante el período de muestreo	43
Cuadro 8 Regresión lineal simple entre la concentración de clorofila y la densidad de organismos fitoplanctónicos totales durante el período muestreado en el epilimnio, Lago Atitlán	45
Cuadro 9 Estado trófico del Lago Atitlán en el epilimnio durante el período de muestreo según el Índice de Carlson	46
Cuadro 10 Estado trófico del Lago Atitlán en el epilimnio durante el período de muestreo según parámetros adaptados de Vollenweider	47

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1 Zonas de un lago.....	3
Figura 2 Disco Secchi.....	6
Figura 3 Representación de la estratificación térmica en cuerpos de agua.....	7
Figura 4 Estratificación y mezcla dentro del Lago Atitlán.....	8
Figura 5 <i>L. robusta</i> en el Lago de Atitlán.....	18
Figura 6 Sucesión estacional clásica de fitoplancton durante medio año en el Lago de Mendota en 1987.....	21
Figura 7 Ubicación del Lago Atitlán en Guatemala.....	29
Figura 8 Imagen satelital del Lago de Atitlán.....	30
Figura 9 Abundancia relativa (%) de los grupos de fitoplancton, Centro Weiss-G, Lago Atitlán desde abril 2010 hasta abril 2012 en el epilimnio.....	37
Figura 10 Abundancia relativa (%) de los grupos de fitoplancton, Centro Weiss-G, Lago Atitlán desde octubre 2010 hasta abril 2012 en el hipolimnio.....	38
Figura 11 Cambios en las densidades de organismos totales, <i>A. granulata</i> y clorofila α durante el período muestreado en el epilimnio, Lago Atitlán.....	39
Figura 12 Cambios en las densidades de <i>L. robusta</i> y clorofila α durante el período muestreado en el epilimnio, Lago Atitlán.....	40
Figura 13 Cambios en la concentración de nutrientes con fósforo y de la razón N:P durante el período muestreado en el epilimnio, Lago Atitlán.....	41
Figura 14 Cambios en la concentración de nutrientes con nitrógeno y de la razón N:P durante el período muestreado en el epilimnio, Lago Atitlán.....	42
Figura 15 Concentración de clorofila α y de ortofosfatos (PO_4^{3-}) en el	

epilimnio, Lago Atitlán durante el período muestreado	44
Figura 16 Espectrofotómetro Agilent 8453	66
Figura 17 Celda adaptada para espectrofotometría de 5cm	67

RESUMEN

El Lago Atitlán es una fuente importante de recursos naturales y económicos para Guatemala. Recientemente se ha visto afectado por la presencia de la cianobacteria *L. robusta*. El objetivo principal del presente estudio fue determinar si existe una correlación entre nutrientes con fósforo o nitrógeno y densidad de fitoplancton, *A. granulata*, *L. robusta* y biomasa fotosintética desde abril 2010 hasta abril 2012 en el Centro-Weiss G del Lago Atitlán. Para lograr estos objetivos se realizaron análisis cualitativos y cuantitativos de fitoplancton y análisis utilizando espectrofotometría de nutrientes y clorofila. Los datos fueron analizados utilizando “PAST Versión 2.17”

Se determinó que no sólo existe una mayor densidad de fitoplancton en el epilimnio que en el hipolimnio, sino que también mayor diversidad de fitoplancton. En el epilimnio se observó una dominancia de Bacillariophyta, Chlorophyta y Chrysophyta, mientras que en el hipolimnio únicamente de Bacillariophyta. Se observó un patrón en el cambio anual de densidad de células de *L. robusta* y de la razón N soluble: P soluble. Se obtuvo una correlación positiva entre la concentración de ortofosfatos y clorofila α . Estos resultados sugieren que medir biomasa fotosintética con espectrofotometría podría ser un mejor método para determinar la cantidad de fitoplancton que la microscopía. Se observó un exceso de fósforo, según el Índice de Carlson y parámetros de Vollenweider (modificado Wetzel, 2001), lo que sugiere que el nitrógeno podría ser un nutriente limitante.

Se recomienda realizar análisis con otros nutrientes y factores químicos para determinar las razones del comportamiento del fitoplancton en el Lago Atitlán.

I. INTRODUCCIÓN

A. Antecedentes

1. Los lagos.

Según PREPAC un lago se define textualmente como:

«Cuerpo de agua encerrado, sin comunicación inmediata con el mar; con profundidades mayores a los 10 m. Pueden tener varios orígenes: Glacial, represamiento (natural), sedimentación, erosión hídrica y eólica, volcánico. Los lagos pueden ser salados salobres o dulces» (OIRSA, 2012).

Las cuencas de los lagos usualmente se forman a partir de accidentes geográficos. Una vez formada la cuenca, ésta se llena con material transportado desde el área de drenaje y se acomoda en el fondo. El material orgánico producido en el lago también contribuye a la sedimentación del material (Blomqvist y Brunberg, 1998).

La geomorfología de un lago define sus características, químicas y biológicas, su metabolismo, ya que controla su drenaje, ingreso de nutrientes y el volumen de ingreso y salida. La productividad del lago también se ve influenciada, debido a que los lagos muy profundos con poca área superficial, son muy poco productivos, mientras que los menos profundos tienden a tener una mayor productividad (Wetzel, 2001).

El Lago Atitlán tiene un origen volcánico. Los lagos de origen volcánico se pueden formar a partir de la expulsión de desechos volcánicos que forman un orificio o por el enfriamiento del magma que al ser desechado, puede llegar a formar cavidades y depresiones. Dado que estos lagos tienden a tener áreas de drenaje limitadas, usualmente tienen una baja concentración de nutrientes y son poco productivos. El Lago Atitlán se clasifica como “caldera”, que son los formados a partir del hundimiento del techo de una cámara magmática parcialmente vaciada y tienen un diámetro mínimo de 5km (Wetzel, 2001).

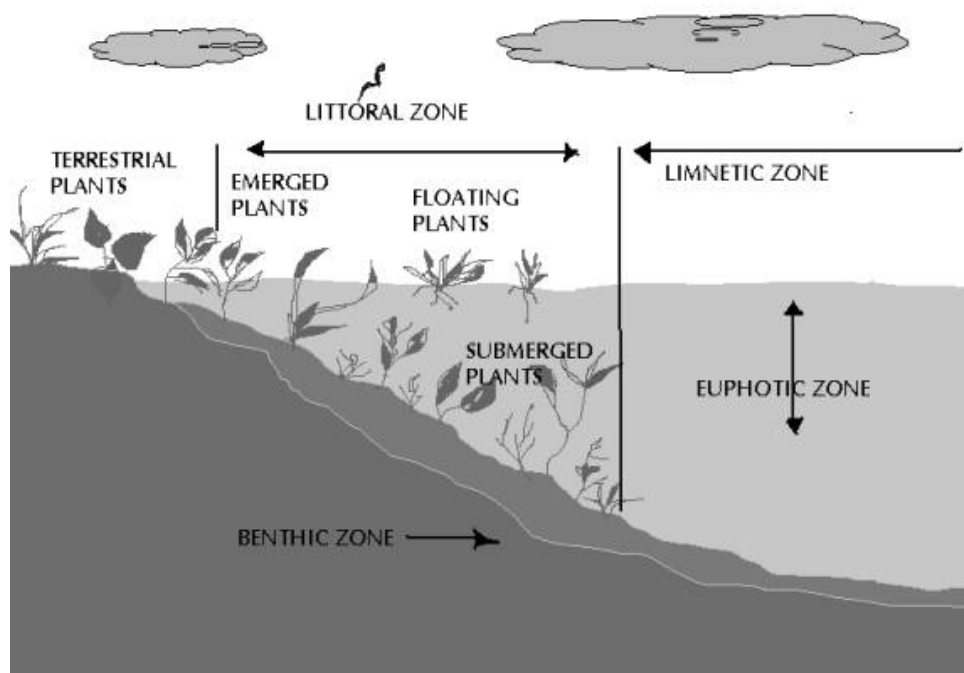
Típicamente los lagos tienen tres zonas de comunidades biológicas de acuerdo con la estructura física del cuerpo de agua (Ramachandran y Ahalya, 2002).

a. Zona litoral. Esta zona representa la transición entre dos ambientes (terrestre y lacustre), está cerca de la ribera y dado que la luz penetra hasta el fondo, permite que las macrófitas crezcan; por esta razón, y que es rica en oxígeno (por el constante movimiento de las aguas), alberga a más especies de animales que otras zonas. Se pueden encontrar caracoles, esponjas incrustadas a rocas, sanguijuelas, larvas de moscas y camarones. La mayoría de animales viven en la superficie de las hojas o entre las raíces de plantas. También se encuentran microorganismos, como diatomeas y cianobacterias (Ramachandran y Ahalya, 2002).

b. Zona limnética o pelágica. Es la parte donde la luz no penetra hasta el fondo. En esta zona habita el plancton (suspendidos en el agua) y el neuston (habilidad natatoria). El neuston es la comunidad que vive en la interface de la atmósfera y el agua, lo logran gracias a la tensión superficial del agua. También habitan peces que son importantes para la alimentación humana y de aves (Ramachandran y Ahalya, 2002).

c. Zona béntica. Es la capa que está en el fondo del lago y está cubierta por pequeñas capas de lodo y arena. Los organismos que ahí habitan pueden vivir en el sustrato, adheridos a la superficie, moverse entre el fondo y la superficie del sustrato, o en el fondo. Los productores primarios de esta zona son las cianobacterias, algas eucariotas y plantas con flores. Las algas que están adheridas a un sustrato son llamadas bénticas. Un pez característico de esta zona es la carpa, que no ve a sus presas, pero las siente con sus bigotes. También se pueden encontrar otros animales como gusanos, larvas y moluscos; así mismo también están presentes animales más pequeños como nematodos y ostrácodos (Ramachandran y Ahalya, 2002).

Figura 1 Zonas de un lago



(Ramachandran y Ahalya, 2002)

En la figura se pueden observar las tres zonas por las que se compone un lago en base a comunidades biológicas y estructura del mismo: la zona litoral cercana a la ribera, la limnética donde la luz no llega al fondo y la zona béntica que representa el fondo cubierto de arena y lodo.

La fauna de la zona béntica depende de la producción de la zona fótica, las heces de los animales en la zona pelágica sirven de alimento para los heterótrofos de la zona béntica. El plancton puede funcionar como alimento en cualquier área donde sea transportado por las corrientes. Existen otros organismos que viven en diferentes zonas durante diferentes partes de su ciclo de vida, como por ejemplo copépodos y algunos peces, otras especies cambian su ubicación a diferentes horas del día (Ramachandran y Ahalya, 2002).

2. Características fisicoquímicas

a. Luz. La región del espectro electromagnético visible (la luz), tiene un extremo continuo a la región infrarroja y el otro a la ultravioleta, siendo la región infrarroja de mayor longitud de onda, pero menor energía, ocurriendo lo contrario para la ultravioleta. En el rango de 400nm a 280nm, la luz ultravioleta puede ser muy dañina para el sistema responsable de la fotosíntesis en algas, como se puede observar en el Cuadro 1 (Skinner, 2009).

La luz que recibe el Planeta Tierra del Sol, es filtrada por el ozono, agua, oxígeno, dióxido de carbono y contaminantes del aire, antes de entrar en contacto en la superficie. La luz que entre a la atmosfera puede ser absorbida por átomos o moléculas, reflejada (por lo general entre un 5% a un 6%) o refractada por el agua, plancton, materia disuelta o suspendida (aproximadamente un 25%) (Skinner, 2009).

Cuadro 1 Relevancia biológica de las diferentes longitudes de onda de la luz

Nombre	Longitud de onda	Relevancia biológica
Radio	100km-10cm	Poco efecto
Infrarrojo	1mm-1 nm	Calienta el agua y puede ser usada por algunas bacterias para fotosíntesis
Visible rojo-naranja	700-570 nm	Visible, para fotosíntesis y calienta el agua
Visible verde	570-490 nm	Visible, para fotosíntesis (algunas algas) y calienta el agua
Visible azul	490-400 nm	Visible, para fotosíntesis y calienta el agua
Ultravioleta UVA	400-320 nm	Mutagénesis y daño celular
Ultravioleta UVB	320-280 nm	Mutagénesis y daño celular
Ultravioleta UVC	280-200 nm	Mutagénesis y daño celular, no presente en niveles significativos en la naturaleza
Rayos UV extremos, X y gamma	10-10 ⁻⁶ nm	Mutagénesis y daño celular, no presente en niveles significativos en la naturaleza

(Skinner, 2009)

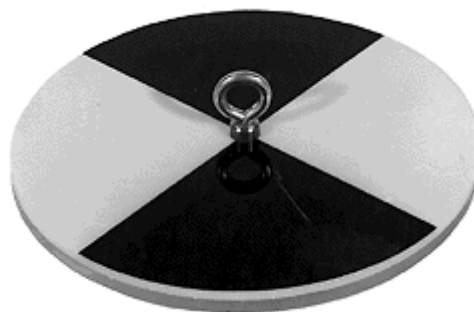
En el Cuadro se puede observar el efecto en los ecosistemas que tienen las diferentes longitudes de onda de la luz. Las células fotosintéticas, son capaces de lograr la fotosíntesis únicamente a determinadas longitudes de onda, dependiendo del organismo del que se trate (Skinner, 2009).

La radiación solar es determinante para los ambientes acuáticos debido a que controla el metabolismo de los mismos al ser la base de la fotosíntesis. La energía que se

almacena mediante este proceso puede ser sintetizada dentro del lago (autóctona) o provenir de fuentes externas (alóctona). El calor absorbido (aproximadamente el 53% de la energía lumínica en el primer metro de profundidad) influye en la estratificación térmica y la circulación del agua (Wetzel, 2001).

La radiación fotosintéticamente activa (PAR, por sus siglas en inglés) está comprendida entre 400 y 700nm, pero puede ser tan baja como 290nm, aunque en números tan pequeños tiene poca disponibilidad bajo el agua, se puede describir en forma de energía o fotones (cuanto). La irradiación fotosintética es la energía radiante por tiempo en una superficie (W/m^2), mientras que la densidad del flujo de fotones fotosintéticos es el número de fotones (cuantos) incidentes por tiempo en una superficie ($\mu mol/m^2s$). La velocidad de absorción de cuantos y energía varía dependiendo de la turbidez del cuerpo de agua: mientras más turbio, se absorbe más rápido la energía que los fotones y viceversa. La tasa de esta variación no es más grande que un $\pm 10\%$ (Wetzel, 2001).

Figura 2 Disco Secchi



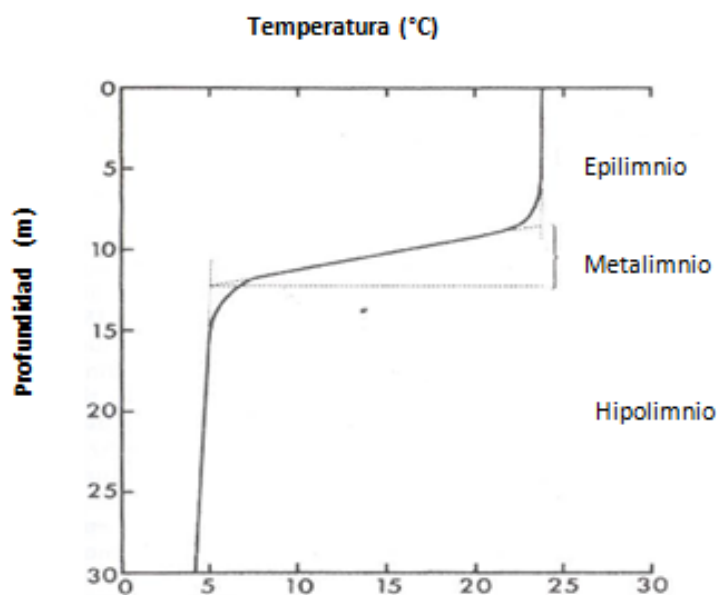
En la figura se puede observar una fotografía donde se muestra la forma del Disco Secchi. Este dispositivo se utiliza para medir la transparencia de un cuerpo de agua.

La lectura Secchi indica el final de la zona fótica (zona en la que penetra la luz) y la profundidad de compensación (donde la cantidad de oxígeno producido, es igual a la consumida). En teoría no existen organismos fotosintéticos debajo de esta profundidad.

La zona afótica es la que se encuentra por debajo de la fótica, donde únicamente puede ocurrir la respiración (Skinner, 2009).

b. Estratificación térmica. El calor (calorías) es una función de la masa (g), temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y calor específico ($\text{cal/g}^{\circ}\text{C}$) de una sustancia. Por esta razón, los lagos cambian de temperatura lentamente, ya que son de gran volumen y el agua tiene un alto calor específico. La energía almacenada en forma de calor, puede alterar los patrones de mezcla y estratificación. La temperatura y la densidad son reguladores de la mayoría de ciclos biogeoquímicos y del metabolismo (Wetzel, 2001).

Figura 3 Representación de la estratificación térmica en cuerpos de agua



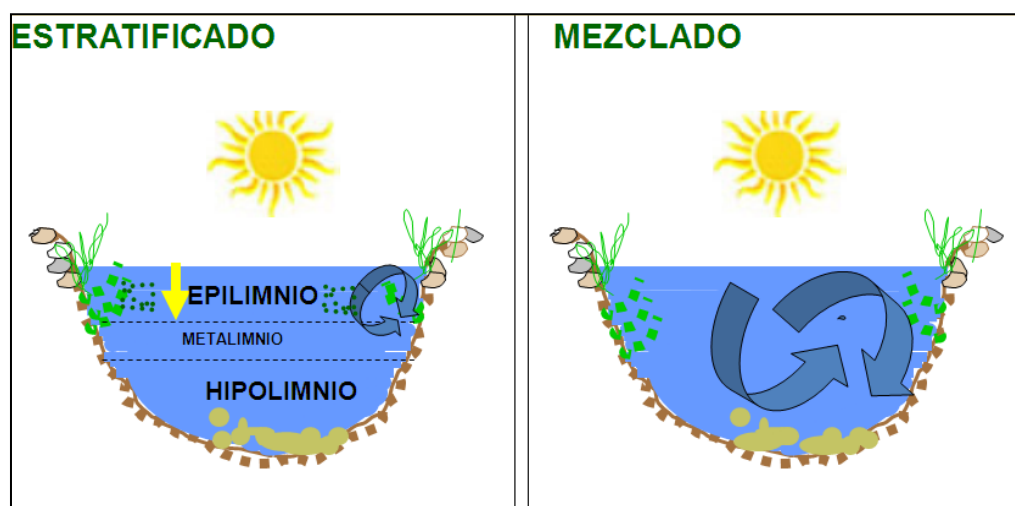
(Dix, *et al.* 2010)

En la figura se puede observar como disminuye la temperatura en un lago, conforme aumenta la profundidad durante la estratificación térmica.

La estratificación ocurre cuando el agua de la superficie se calienta y disminuyen en densidad, lo que forma una capa de agua llamada epilimnio. Por debajo de esta capa se encuentra una capa de agua más fría y más densa. La zona de transición entre estas dos capas, se conoce como metalimnio (ver Figura 3). Esta estratificación provoca que se

forme una barrera, que limita el intercambio de nutrientes y oxígeno entre ambas capas. Esta barrera es un factor importante en el desarrollo del plancton, ya que estos organismos requieren de estos nutrientes para desarrollarse (Dix, *et al.* 2010).

Figura 4 Estratificación y mezcla dentro del Lago Atitlán



(Dix, *et al.* 2010)

En la figura se pueden observar las tres capas de agua que se forman mientras el lago está estratificado y en la figura a la derecha no se observan capas debido a la mezcla de agua. El Lago Atitlán tiende a estratificarse en marzo y se mantiene así hasta finales de año (Dix, *et al.* 2010).

Cuando hay agua caliente, mucha luz solar y los nutrientes en la superficie, se crea un ambiente ideal para el crecimiento de algas en el epilimnio. Cuando el lago está estratificado, el agua únicamente se mezcla en el epilimnio, debido a que el viento hace circular el agua de la superficie, pero el agua caliente no se puede mezclar con el agua más densa del hipolimnio. Debido a la falta de mezcla del agua, no llega oxígeno al fondo y como tampoco llega luz, no puede ocurrir la fotosíntesis, pero sí hay intercambio de materia orgánica. Los organismos aeróbicos pueden disminuir la concentración de oxígeno disuelto en el fondo. La descomposición de las algas muertas

en el fondo por bacterias aeróbicas también aceleran el consumo de oxígeno en esta zona (Videtich y Crooks, 2000).

Si no hay suficientes bacterias anaeróbicas para descomponer todas las bacterias muertas, el fondo del lago será muy rico en nutrientes. Debido a la falta de mezcla, el fondo del lago continuará llenándose de nutrientes, porque estos no podrán llegar a la superficie, ocasionando que las algas comiencen a consumir los nutrientes del epilimnio hasta acabar con ellos, lo que las lleva a su muerte y a sedimentarse en el fondo (Videtich y Crooks, 2000).

Conforme la temperatura disminuye, el epilimnio comienza a disminuir su profundidad, hasta desaparecer, lo que provoca que el lago pierda su estratificación. Los vientos en esta época juegan un papel importante en la mezcla. Nuevamente el lago puede llegar a tener temperaturas uniformes en la columna de agua. Otro factor que favorece la mezcla es que el agua de la superficie, al estar en contacto con el viento, se enfría más rápido, lo que hace que se hunda. La mezcla del agua favorece la distribución de nutrientes y oxígeno en el lago (Videtich y Crooks, 2000).

Debido a las variaciones anuales en la temperatura y las características del viento, los lagos no siempre se mezclan de manera consistente. Los patrones de circulación se pueden clasificar en (Kevern, *et al.* 2004):

1) Amixis. No ocurre ninguna mezcla, usualmente cubiertos por hielo (Kevern, *et al.* 2004).

2) Holomixis. Se da una mezcla total por los vientos, una o más veces al año. Se dividen en cuatro:

a) Lagos oligomicticos. Usualmente tropicales y con una mezcla pobre, irregular y corta. Normalmente se mantienen tibios, más aún de la superficie, la única forma en la que el agua se podría mezclar, sería si la superficie se enfriara.

b) Lagos polimícticos. Tienen muchos periodos de mezcla, casi continuos. Suelen ser pequeños y tropicales, de temperaturas cálidas o de latitudes altas. La circulación se da debido a la convección durante la noche, más que por el viento, ya que los cambios en la temperatura están más influenciados por el cambio de temperaturas durante el día, que durante diferentes cambios anuales.

c) Lagos monomícticos. Tienen un periodo regular de mezcla al año. Pueden ocurrir en climas fríos (cerca de áreas polares, se congela durante el invierno, por lo que se mezclan durante el verano) o cálidos (subtropicales, con veranos largos e inviernos cortos, su estratificación se rompe en invierno, lo que les permite mezclarse).

d) Lagos dimícticos. Ubicados en zonas templadas, tienen dos periodos de mezcla, uno en primavera y otro en otoño por convección en condiciones normales (Kevern, *et al.* 2004).

3) Meromixis. Mezcla parcial o incompleta del lago durante una o más veces al año. Tienen una capa más profunda de agua, con más solutos que los de la superficie, por lo que son más densas y no se mezclan. Esta capa acumula anualmente más sustancias, por lo que se hace más gruesa, hasta formar un volumen considerable del total (Kevern, *et al.* 2004).

c. pH . El pH es la medida de acidez o alcalinidad de una sustancia, va en una escala del 0 al 14, siendo 0 lo más ácido (como por ejemplo ácido clorhídrico puro), 7 neutro y 14 lo más básico (como por ejemplo, el hidróxido de potasio). Se define como el logaritmo negativo de los protones (H^+) en una solución (Addy, *et al.* 2004).

En los ambientes acuáticos el pH del agua es determinante, debido ya que cada organismo tiene un pH ideal para desarrollarse, usualmente entre 6.5 y 8. Si el pH está por debajo de 5, se considera un ambiente acidificado. Aparte de tener un impacto

directo sobre los organismos vivos, también puede afectar a los factores abióticos, por ejemplo un pH ácido puede provocar la liberación de elementos tóxicos como Fe^{3+} y Al^{3+} , y cambiar la disponibilidad de nutrientes, como los fosfatos, amonio, hierro y materiales traza (Addy, *et al.* 2004).

El pH se puede ver afectado por factores como la lluvia ácida, descargas de aguas industriales o domésticas, alteración humana (las municipalidades pueden alcalinizar el agua para evitar la corrosión de las ductos), materia orgánica (liberación de ácidos orgánicos), o dióxido de carbono (por la formación de ácido carbónico). Los lagos endorreicos, como el Lago Atitlán, tienen usualmente pHs altos por contener altas concentraciones de carbonatos, como por ejemplo Na_2CO_3 (Wetzel, 2001 y Addy, *et al.* 2004).

La alcalinidad de un lago se refiere a la capacidad amortiguadora que tenga para responder a la adición de ácidos y lograr mantener un pH estable. Las aguas que tienen buena alcalinidad contienen moléculas como bicarbonatos, carbonatos e hidróxido, que tienen la capacidad de reaccionar con los protones. Estas moléculas pueden provenir de rocas, suelos, sales, plantas acuáticas y descargas industriales o domésticas alcalinas. Debido a que los organismos requieren un de pH específico para desarrollarse, se prefiere que los lagos tengan una alcalinidad más alta (Addy, *et al.* 2004).

La distribución vertical del carbono total inorgánico y el pH están influenciados por reacciones redox biológicas. La utilización del carbono inorgánico por medio de la fotosíntesis, reduce el CO_2 disponible, por lo que se incrementa el pH, por su parte la generación de CO_2 por medio de la respiración celular tiende a disminuir el pH. La degradación heterotrófica de materia orgánica, la generación de CO_2 y la reducción de pH se ven aumentadas por la producción de metano por medio de fermentación microbiana, nitrificación del amonio y oxidación sulfúrica. La desnitrificación del nitrato a nitrógeno molecular, reducción de sulfato a sulfuro, y la reducción de hierro y manganeso tienden a incrementar la alcalinidad. Los procesos de descomposición también, incrementan el carbono total inorgánico y disminuyen el pH (Wetzel, 2001).

d. Conductividad. La conductividad se define como la habilidad del agua para conducir corriente eléctrica, se mide en μohms y varía con cada fuente de agua. La salinidad en aguas dulces tiende a mantenerse en un rango de 100 a 2000 μohms . Esta habilidad de conducción se incrementa con la presencia de sales, debido a que éstas al disolverse, se separan en aniones y cationes. Los más comunes son: Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} y HCO_3^- . La salinidad por su parte, es la medida de sales disueltas (CWT, 2004).

La conductividad se puede ver influida por la lluvia, que en teoría tiene conductividad 0, lo que disminuye la conductividad del cuerpo de agua; por minerales, que liberan iones; por el rocío del océano, que contiene sales; por la mezcla de aguas y por la evaporación, que aumenta la conductividad (CWT, 2004).

e. Nutrientes. Los nutrientes se pueden definir como los átomos fundamentales, como por ejemplo el carbono, fósforo o nitrógeno, que constituyen las biomoléculas, tales como proteínas, ácidos nucleicos, carbohidratos y lípidos, de los tejidos vivos (Bohlen y Narehood, 2003).

Si el agua de un lago se mezcla, los nutrientes también. Esto es de suma importancia para el desarrollo de organismos fotosintéticos. Usualmente la concentración de nutrientes en los lagos es más alta que en los océanos. Las cantidades de los nutrientes en los lagos son determinantes para definir si la cantidad presente en el lago se considera como un nutriente o como un contaminante (Bohlen y Narehood, 2003).

Cuadro 2 Distribución relativa de nutrientes en los lagos

Elemento	Concentración en algas (W%)	Proporción	Concentración media en lagos (W%)	Escasez relativa*
O	80.5	1.948	89	0.9
H	9.7	3.726	11	0.9
C	6.5	210	0.0012	5,416.7
Si	1.3	18	0.00065	2,000.0
N	0.7	19	0.000023	30,434.8
Ca	0.4	4	0.0015	266.7
K	0.3	3	0.00023	1304.3
P	0.08	1	0.000001	80,000.0
Mg	0.07	1.1	0.004	175.0
S	0.06	0.72	0.0004	150.0
Cl	0.06	0.66	0.0004	150.0
Na	0.04	0.67	0.0006	66.7
Fe	0.02	0.14	0.00007	285.7
B	0.001	0.036	0.00001	100.0
Mn	0.0007	0.0049	0.0000015	466.7
Zn	0.0003	0.0018	0.000001	300.0
Cu	0.0001	0.00061	0.000001	100.0
Mo	0.00005	0.00020	0.0000003	166.7
Co	0.000002	0.000013	0.00000005	400.0

* *Concentración en algas / Concentración media*

(Bohlen y Narehood, 2003)

En el cuadro se muestran los elementos más comunes en los lagos, su porcentaje en las algas, la proporción de unos a otros, su concentración relativa en los lagos y su escasez relativa, que viene dado por la razón entre la concentración de algas y la concentración media en el lago

Usualmente se consideran 16 elementos como esenciales para el desarrollo de organismos fotosintéticos: C, H, O, N, P, K, S, Ca y Mg, como macrot nutrientes, y Fe, Mn, B, Zn, Cu, Mo y Cl, como micronutrientes. Las muestras ricas en nitrógeno, tienden también a tener altas concentraciones de fósforo. En ambientes acuáticos los elementos dominantes son H y O, así como una variedad de sales compuestas en parte por Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , y NO_3^- . La concentración de estas sales puede variar

en diferentes puntos del lago. El resto de los elementos está contenido en rocas y minerales (Bohlen y Narehood, 2003).

Las células de los seres vivos son paquetes de estos elementos con proporciones definidas de cada uno. Cuando los seres vivos mueren, los elementos contenidos en sus células, se depositan en el fondo, enriqueciendo el lago en la proporción de elementos contenida en sus células. Normalmente los macronutrientes son los que tienden a limitar los ambientes lacustres (Bohlen y Narehood, 2003).

Como se puede observar en el Cuadro 2, el nitrógeno y el fósforo son los elementos con más escasez relativa, siendo aún más limitante el fósforo. Estos elementos también están contenidos en fertilizantes, por lo que se pueden filtrar desde los cultivos anexos a los lagos, lo que provoca florecimientos de algas, lo que a su vez estimula el crecimiento bacteriano, lo que produce una disminución en el oxígeno disuelto, disminuyendo la población de peces. Por esta razón, la disminución de oxígeno disuelto y el aumento de organismos fotosintéticos son signos de una alta concentración de nutrientes (Bohlen y Narehood, 2003).

f. Estado trófico. Es un sistema en el que frecuentemente se clasifican los lagos, basado en la productividad o riqueza de nutrientes del lago. La escala va desde oligotrófico (pobre en nutrientes y agua muy clara) hasta hierpeutrófico (muy rico en nutrientes y muy poca claridad) (Kevern, *et al.* 2004).

Cuadro 3 Parámetros fisicoquímicos más significativos para la clasificación del estado trófico de lagos 2004

Parámetro	Valor estadístico	Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico
Fósforo total (mg/m ³)	Promedio	8	26.7	84.4
	Rango	3.0 - 17.7	10.9 - 95.6	16 – 386
Clorofila <i>a</i> (mg/m ³)	Promedio	1.7	4.7	14.3
	Rango	0.3 - 4.5	3 – 11	3 – 78
Profundidad Disco Secchi (m)	Promedio	9.9	4.2	2.45
	Rango	5.4 - 28.3	1.5 – 8.1	0.8 – 7.0

(Kevern *et al.* 2004)

En el cuadro se muestra la clasificación trófica de un lago según los rangos y el promedio de fósforo total, clorofila *a* y lecturas del Disco Secchi, como se puede observar los rangos entre uno y otro se traslapan (Kevern, *et al.*).

Un lago oligotrófico demuestra productividad baja, debido a que los nutrientes que los organismos fotosintéticos requieren para crecer son bajos. En este tipo de lagos sostiene una baja biomasa, por lo que el fitoplancton, zooplancton, perifiton, macrófitas, bacterioplancton y peces están presentes en comunidades pequeñas. Esto no significa que hayan pocas especies de estos organismos, sino que hay pocos individuos de cada especie, por lo general los peces son pequeños (Kevern, *et al.* 2004).

Un lago oligotrófico se caracteriza por estar bien oxigenado desde la superficie al fondo, debido al bajo consumo de éste gas que hay en el lago. También se caracterizan por medidas del disco Secchi que van desde 5.4m hasta 28.3m, pocas algas suspendidas, medidas bajas de clorofila (1.7mg/m³ en promedio) y fósforo (8.0mg/m³ en promedio). La sobrepoblación humana y la sobreexplotación de recursos tienden a convertir estos lagos en eutróficos (Kevern, *et al.* 2004).

Un lago eutrófico es el contraste del lago oligotrófico, debido que es muy rico en nutrientes y su productividad es muy alta. Está caracterizado por una alta densidad de

fitoplancton, que enturbia el agua, por lo que las lecturas del Disco Secchi están entre 0.8m a 7.0m. La alta densidad de fitoplancton, es alimento para producir altas concentraciones de zooplancton, lo que resulta a su vez, en alimento para peces. Grandes poblaciones de estos organismos, resultan en una alta producción de materia orgánica, de la cual un buen porcentaje se sedimenta en el fondo, que sirve de alimento para el bacterioplancton, que junto al fitoplancton descendente, consumen el oxígeno de las profundidades del lago, por lo que estos lagos están caracterizados por ser anóxicos en la época de estratificación (Kevern, *et al.* 2004).

Químicamente los lagos eutróficos se caracterizan por concentraciones de clorofila $\geq 14\text{mg/m}^3$ y 80mg/m^3 de fósforo, en promedio. Debido a la alta concentración de nutrientes y a la materia orgánica sedimentada en el fondo, es muy común que se formen capas de macrófitas en la zona litoral. En contraste con los lagos oligotróficos, la pesca es económicamente importante en estos cuerpos de agua (Kevern, *et al.* 2004).

En un lago mesotrófico la producción de fitoplancton es intermedia, por lo que se puede observar acumulación de sedimento y pérdida de oxígeno cerca de las profundidades. Las características de luz, nutrientes y biomasa, se encuentran en medio de las mencionadas para los lagos eutróficos y oligotróficos. La pesca es bastante buena, pero no soportan tanta como un lago eutrófico (Kevern, *et al.* 2004).

Cuando se observa un lago, con características dentro de los valores que se traslapan, se dice que está entre ser eutrófico y mesotrófico o entre oligotrófico y mesotrófico. Otro factor que se puede mencionar, es que dado que los lagos conforme envejecen, acumulan más nutrientes y sedimentos, se vuelven cada vez más eutróficos, por lo que surgió la clasificación de “lago hiperutrófico”, cuando los valores de sus características fisicoquímicas están fuera de estos límites. Este término fue propuesto por Vollenweider a finales de los años 60, donde también se resaltó el fósforo como nutriente limitante en los ecosistemas de agua dulce y como desencadenante de la eutrofización (Bonilla, *et al.* 2009 y Kevern, *et al.* 2004).

3. Fitoplancton.

“Fitoplancton” se define como los organismos suspendidos en el agua, que no pueden nadar, por lo que su movimiento depende de las corrientes de agua y que sintetizan su propio alimento por medio de fotosíntesis, por esta razón están limitados a las zonas del lago donde llegue la luz solar y que hayan los suficientes nutrientes para sintetizar su alimento. En el mar son los responsables del 95% de la productividad primaria, por lo que constituyen la base alimenticia del ecosistema acuático (Ramírez, 2010).

Está compuesto principalmente por cianobacterias (Cyanophyta), dinoflagelados (Pyrrophyta), diatomeas (Bacillariophyta), algas pardas (Phaeophyta), algas verdes (Chlorophyta) y haptófitos (Haptophyta). Algunas cianobacterias tienen la capacidad de fijar nitrógeno y pueden llegar a ser tóxicas; por su parte las diatomeas están compuestas por sílice en forma de caja Petri (porción interna: hipoteca y porción externa: epiteca). Tienden a ser comunes en aguas frías. Los dinoflagelados tienen dos flagelos de forma perpendicular, por lo que pueden girar para desplazarse. Algunos de estos son tóxicos, los organismos filtradores pueden acumular sus toxinas y pasarlas por la cadena trófica (Ramírez, 2010).

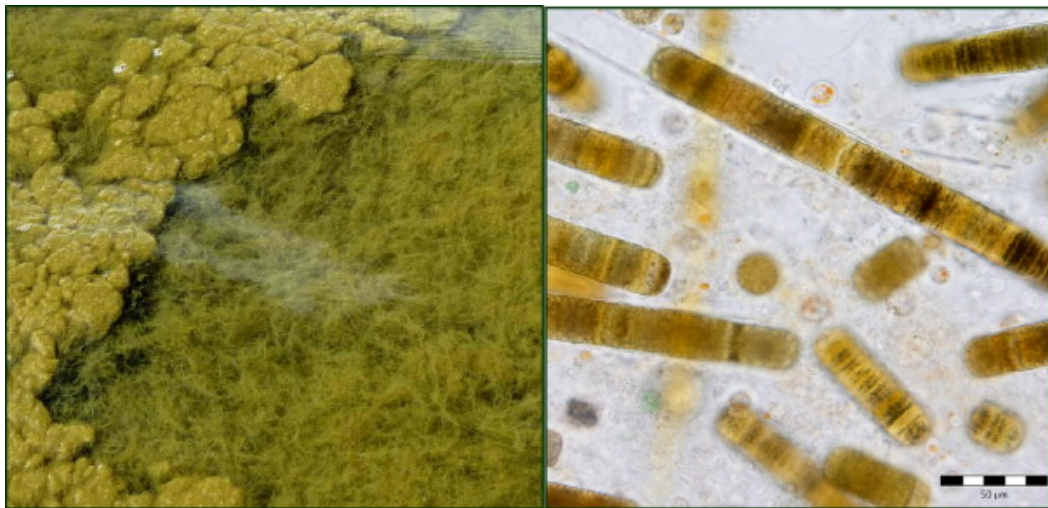
a. *L. robusta*. El género *Lyngbya* se caracteriza por formar filamentos gruesos (tricomas), isopolares, rectos o levemente curvos, largos (5.5 a 60 μ m) raramente solos, de color pardo, no ramificados, usualmente abiertos en los extremos, cubiertos de una vaina firme, en ocasiones estratificada. Los hormogonia (filamentos formados para la reproducción) se observan sin vaina. Los filamentos usualmente forman tapetes gruesos, estratificados y macroscópicos de varios centímetros o decímetros (Komárek y Hauer, 2012).

Las células de este género son discoides, no móviles (levemente móviles en los hormogonia), normalmente más pequeñas que largas, raramente con aerotropos facultativos, contienen pigmentos verdeazules, verde oscuro, amarilloso o rosados. Tienen tilacoides enrollados alrededor de todo el contenido celular. La última célula del

tricoma tiene una pared celular más gruesa o con una caliptra prominente. No forman heterocistos, ni acinetos (Komárek y Hauer, 2012).

La especie de *Lyngbya* que se encuentra en Atitlán es la especie *L. robusta* (ver Figura 5), esta se observa en el metafiton, no produce toxinas, se caracteriza por tener una alta concentración de carotenoides entre sus pigmentos (lo que resulta inusual para el resto de cianobacterias), puede fijar nitrógeno y posee aereotopos (Comunicación personal del Dr J. Komárek, 2010 y 2012).

Figura 5 *L. robusta* en el Lago de Atitlán



(Rejmánková, *et al.* 2011)

A la izquierda se puede observar los tapetes formados por esta cianobacteria en el Lago, y del lado derecho se observan los tricomas bajo el microscopio (Amplificación 400x)

b. Pigmentos. Los pigmentos son moléculas capaces de reflejar y absorber ciertas longitudes de onda específicas, es por esta razón que hay organismos que producen pigmentos de diferentes colores. En los organismos fotosintéticos se encargan de capturar la energía solar (ver Cuadro 4) (Speer, 1997).

Existen tres clases básicas de pigmentos (ver Cuadro 5):

1) Clorofilas. Son pigmentos verdosos con un molécula de porfirina. Esta tiene forma de anillo y mucha facilidad para ganar o perder electrones, por lo que puede proveer electrones energizados a otras moléculas. La clorofila más importante es la *a*, que funciona pasando sus electrones energizados a otras moléculas hasta formar azúcares. Está contenida en todas las plantas, algas y cianobacterias. La clorofila *b* únicamente se da en las algas verdes y plantas, la clorofila *c*, únicamente en los Chromista y dinoflagelados. Estas diferentes moléculas se han utilizado para descifrar relaciones evolutivas (Speer, 1997).

Cuando el anillo de clorofila pierde su átomo de magnesio, se forma la feofitina. Esto es más común en la clorofila *a*, que en la *b*, debido a que la segunda es más estable. Este cambio molecular es favorecido por pHs ácidos, debido a que dicho átomo es sustituido por dos protones H^+ , y en medio acuoso es permanente. El calor es otro factor que puede influir en esta transición, debido a que el rompimiento de las células puede liberar ácidos contenidos en ellas. Esta molécula puede unirse con átomos de zinc o cobre, en el lugar donde estaba el magnesio (Calvo, 2005).

2) Carotenoides. Son pigmentos color rojo, anaranjado o amarillo. Están compuestos por 2 anillos de 6 átomos de carbono, que a su vez están conectados por más átomos de carbono. Son hidrofóbicos y se encuentran dentro de la célula unidos a membranas. Son llamados pigmentos accesorios debido a que no pueden transferir la energía directamente a la fotosíntesis, sino que usan a la clorofila como intermediaria. La fucoxantina es un ejemplo de estos pigmentos, presente en diatomeas y algas pardas. Su banda principal de absorción es 450nm (ver Cuadro 4) (Speer, 1997).

3) Ficobilinas. Son solubles en agua y están presentes en el citoplasma o el estroma del cloroplasto de cianobacterias y algas rojas. La ficocianina y la ficoeritrina pertenecen a esta división, de estos pigmentos obtuvieron su nombre las cianobacterias y las algas rojas respectivamente (Speer, 1997).

Cuadro 4 Bandas de absorción principales de la clorofila α y los pigmentos accesorios

Pigmento	Banda de absorción principales (nm)
Clorofila α	663 y 430
Clorofila b	645 y 435
Clorofila c	634, 583 y 440
Carotenoides	450
Ficoeritrina	~550
Ficocianina	~625

(Bixby, 2009)

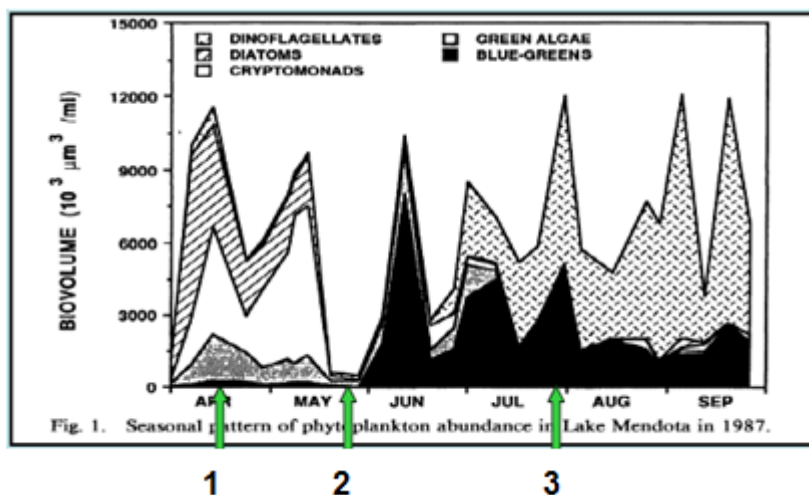
Cuadro 5 Pigmentos accesorios presentes en las principales divisiones de algas

División	Nombre común	Pigmento accesorio
Chlorophyta	Algas verdes	Clorofila b
Charophyta	Carófitos	Clorofila b
Euglenophyta	Euglenoides	Clorofila b
Phaeophyta	Algas pardas	Clorofila c1+c2 y fucoxantina
Chrysophyta	Algas doradas	Clorofila c1+c2 y fucoxantina
Pyrrhophyta	Dinoflagelados	Clorofila c2 y peridina
Cryptophyta	Criptomónidos	Clorofila c2 y ficobilinas
Rhodophyta	Algas rojas	Ficoeritrina y ficocianina
Cyanophyta	Algas verde azules	Ficocianina y ficoeritrina

(Robertson, 2011)

c. Bioindicadores fitoplanctónicos en lagos. El fitoplancton se utiliza como bioindicador debido a que tiene requerimientos específicos, es fácil de coleccionar en grandes cantidades sin impactar significativamente al ecosistema, tiene una respuesta rápida a los cambios ambientales, como por ejemplo pH, conductividad, luz, temperatura, nutrientes de cualquier origen y estacionalidad climática. Para hacer un análisis significativo del estado del lago, aparte de medir las densidades celulares y las frecuencias relativas del fitoplancton, se deben hacer mediciones de clorofila α , las formas de crecimiento y biovolumen (Bixby, 2009).

Figura 6 Sucesión estacional clásica de fitoplancton durante medio año en el Lago de Mendota en 1987



(Bixby, 2009)

En el eje Y se puede observar el biovolumen del fitoplancton y en el eje X los meses del año en el que fue medido. Los números bajo la gráfica representan: 1) dominancia de diatomeas y dinoflagelados y un gran pastoreo por parte del género *Daphnia* (crustáceo), 2) disminución en la biomasa del fitoplancton, 3) dominancia de cianobacterias, disminución del pastoreo y limitación de nutrientes (Bixby, 2009).

En sitios donde ocurren las cuatro estaciones climáticas del año, tiende a haber baja biomasa y una dominancia de dinoflagelados y diatomeas durante el invierno, seguido por un florecimiento de diatomeas, mucha biomasa, poca luz, bajas temperaturas y mucha movilidad de nutrientes durante la primavera. En verano tiende a haber una dominancia de algas verdes, un gran consumo de nitrógeno, seguido por la dominancia de cianobacterias que fijan el nitrógeno y por último, en el otoño, hay otro florecimiento de diatomeas, poca luz, bajas temperaturas y un gran flujo de nutrientes (Bixby, 2009).

Muchas de las cianobacterias son fijadoras de nitrógeno, por lo que no requieren que haya nitrógeno disuelto en el agua, pero para ahorrar energía, se dan más fácilmente en aguas eutrofizadas, por lo que pueden formar ahí florecimientos. Géneros como

Microcystis y *Anabaena* pueden producir toxinas. Las algas verdes son muy cercanas evolutivamente a las plantas, sirven de alimento para el zooplancton pastoreador, dependiendo de la especie, es la condición ambiental en la que se dan más fácilmente, pero en general se dan en aguas calientes con mucha luz y pueden ser indicadoras de productividad. Las diatomeas son un grupo muy diverso, que forma una parte importante de la biomasa del lago la mayor parte del año y cada especie se utiliza como bioindicadora de diferentes condiciones. Las crisofitas tienen una química similar a la de las diatomeas, pueden llegar a ser parte importante de la biomasa del lago y en ocasiones son mixotróficas; los euglenoides también son mixotróficos y los dinoflagelados son comunes en condiciones eutróficas (Bixby, 2009).

4. Lago de Atitlán y estudios previos en Guatemala.

En 1908 Meek realizó el primer estudio en el Lago Atitlán, referente a pesca. Dado que las condiciones para pescar eran muy malas, éste científico recomendó la introducción de algunas especies. También en 1908 Tildan sentó bases de cambios y químicos en el Lago y Clark de las algas. El primer estudio limnológico serio se realizó en 1915 por Juday, lo que sentó las primeras referencias de los cambios químicos y biológicos en el Lago de Atitlán (Weiss, 1970).

En 1950 Holloway publicó *Recommedatios for the Development of the Fisheries Resources of Guatemala*, donde se recomendó mejorar las trampas para la pesca y así lograr abastecer las necesidades alimenticias y la introducción de la lobina negra y perca de boca grande, en caso de que la carpa se volviera muy numerosa. En 1957 Deevey publicó *Limnologic Studies in Middle America*, donde comparó características hidrográficas y químicas con otros lagos de Centro América (Weiss, 1970).

En 1967 Powers y Bowes publicaron que la perca de boca grande se convirtió en predador de los polluelos de la última población que quedaba en el mundo (en Atitlán) del ave *Podilymbus gigas*. Se hizo un área protegida donde se exterminó a dicho pez y permitió la reproducción del ave. En 1968 Dorris y Sumerfelt, prepararon una propuesta

al gobierno nacional para el desarrollo de la pesca, donde se realizarían largos análisis limnológicos (Weiss, 1970).

Entre 1968 y 1970 Weiss realizó un estudio para determinar si era viable que el Lago de Atitlán se utilizar para producir energía. Observó una estratificación temporal y mezcla del agua en el Lago. Las temperaturas más altas de la superficie fueron asociadas con el final de la época seca, dándose las temperaturas más cálidas en mayo. En junio, la época lluviosa permitía el enfriamiento de la superficie hasta agosto. Se daba una estratificación definida durante marzo hasta principios de diciembre, a mediados de diciembre ocurría la mezcla completa del agua, que duraba hasta febrero. La claridad del Lago mostró leves cambios asociados a la época lluviosa, rangos que iban desde 8m hasta 20m. Se mostró que mientras menos transparencia, la luz verde penetraba más profundamente, mientras que una mayor transparencia mejoraba la penetración de menores longitudes de onda. La luz azul penetraba más profundamente que la verde cuando se observa la máxima claridad del Lago (Weiss, 1970).

No se observó una variación significativa de las especies y cantidad de plancton en los primeros 20m de profundidad (a excepción de Santiago y San Lucas donde se obtuvo más biomasa). La mayor cantidad de plancton ocurría al final de la época lluviosa y por debajo de la superficie. El zooplancton tuvo su mayor población en las mayores profundidades (asociado con las migraciones diarias verticales) y se observó una variación taxonómica durante el año. A diferencia de 1910, entre 1968 y 1970 el género *Ceratium* y las especies *Bosmina longirostris* (indicador de transición de estado oligotrófico a eutrófico), *Platylabus patulus* y *Asplanchna priodonta* ya eran bastante comunes (previamente no observados). La producción primaria medida *in situ* (con C^{14}) le dio al Lago de Atitlán la clasificación de lago oligotrófico, pero los resultados de bioensayos de consumo de oxígeno, lo clasificaron como eutrófico. Los resultados de la química de la columna de agua fueron atípicos, lo que podría indicar contribución de aguas subterráneas y de actividad biológica. Desde 1950 hasta 1970, se observaron concentraciones constantes de fósforo, con un leve aumento de nitrógeno. Se propuso

que la influencia que los ríos que desembocan en el Lago, podrían cambiar totalmente la química y la biología del Lago en un período de tiempo no determinado (Weiss, 1970).

La primera vez que se reportó el género de cianobacterias *Microcystis*, en el Lago Atitlán fue por Dix en 1976. En el 2002, Preston y Romero observaron dicha cianobacteria en San Lucas Tolimán. Entre 2001 y 2006, Castellanos y Girón realizaron el estudio “Calidad Microbiológica del Agua del Lago de Atitlán para los años 2001 y 2006”. Se demostró el efecto de la contaminación proveniente de los pueblos anexos al Lago y se observó una buena calidad de agua, a excepción de los sitios continuos a grandes poblados. Se demostró la degradación del agua gracias al vertido directo al agua de las aguas servidas. Se determinó la no toxicidad del agua y se observó una posibilidad de eutrofización (Domingo y Romero, 2012 y Castellanos y Girón, 2009).

En el 2008 la Universidad del Valle de Guatemala y la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago y su Entorno (AMSCLAE), reportaron la presencia en varios puntos del Lago lo que se identificó como *Lynghya hironymusii*, ahora conocida como *L. robusta*. En el 2009 se reportó el mayor florecimiento de esta cianobacteria, esta vez cubriendo un 38% del área superficial del Lago (Domingo y Romero, 2012).

Se realizó un estudio sobre los florecimientos ocurridos en el Lago, en el 2008 y 2009. Se publicó que fueron ocasionados por la especie *L. robusta*, siendo el primer caso reportado a nivel mundial. El florecimiento máximo había llegado a cubrir un 40% del área del Lago. Se alcanzaron concentraciones de clorofila *a* hasta de 100µg/L. Respecto a toxinas del florecimiento del 2009, se reportó que únicamente se encontraron trazas de Cilindrospermopsina y Saxitoxina. Esta información fue corroborada posteriormente por la Universidad de San Pablo de Brasil. Se encontró que la fijación de nitrógeno corresponde a cianobacterias que no poseen heterocistos. Se obtuvo una proporción molar en la célula correspondiente a 105:14.4:1 de C, N y P. Se recomendó realizar un programa de monitoreo, control del ingreso de nutrientes y educación ambiental (Rejmánková, *et al.* 2011, Roegner, *et al* 2010, Domingo y Romero, 2012).

Cabe mencionar que el Lago de Amatitlán es de origen volcánico y en la actualidad este lago está afectado por florecimientos de la cianobacteria tóxica *Microcystis aeruginosa*. En 1983 Cronberg identificó en Amatitlán la presencia de la misma especie del género *Lyngbya* presente en Atitlán (AMSA, 2010 y Expedición Científica 2012).

En el 2010 se realizó la “Expedición Científica 2010”. Se observó una composición planctónica uniforme en todo el Lago, consistente con reservorios mesotróficos. Las especies dominantes fueron *Ceratium* cf. *hirundinella* y *Fragilaria crotonensis*. Se observó una especie de *Dinobryon* como codominante. Este comportamiento se observó entre 20m y 30m, arriba de esta profundidad se observó una comunidad parcialmente desarrollada, principalmente compuesta por algas verdes y diatomeas. Debajo de 30m casi no se observó comunidad planctónica. Se reportó la presencia *Botryococcus* cf. *braunii*, potencial formadora de florecimientos. Se observó la especie *L. robusta* en filamentos en buen estado. No se observó una distribución homogénea de hormogonia. Se observaron células solitarias de *Microcystis* en todo el Lago correspondientes a dos variedades de éste género: *M. aeruginosa* y *M. botrys* (Lago de Atitlán Expedition, 2010).

Durante la segunda Expedición Científica en el 2012, se realizaron análisis químicos y biológicos en el Lago de Atitlán. Se observó una disminución en la concentración de nitratos y fosfatos conforme aumentaba la profundidad durante la noche. Se compararon las lecturas del Disco Secchi, con las lecturas obtenidas por Weiss, en el 2010 y 2011, se observó una disminución en la claridad del Lago. Se analizó la actividad de la nitrogenasa durante la noche y se determinó que es similar a la de especies marinas relacionadas. Se observó una limitación de nutrientes (N y P) al final de la época seca, lo que indica una colimitación en el epi y metalimnio. Respecto al fitoplancton, se observó una dominancia relativa entre los 0m y 15m de profundidad de désmidos, seguido por una dominancia a partir de aproximadamente los 20m hasta los 35m, de dinoflagelados. Respecto al zooplancton se observaron cladóceros, rotíferas,

copépodos y ciliados. Se detectó *Cylindrospermopsina* y *Saxitoxina* en muestras del 2011 en concentraciones insignificantes (Dix, *et al.* 2012).

B. Justificación

El Lago de Atitlán es una fuente de recursos económicos, por las actividades de pesca, colecta de tul y por ser un atractivo turístico a nivel nacional.

Atitlán es el segundo destino turístico más visitado en Guatemala. Aproximadamente 17% de los turistas internacionales que llegan al país, visitan el Lago Atitlán. Sololá es el departamento en Guatemala, con la segunda mayor cantidad de hoteles, superado únicamente por el departamento de Guatemala (Wallace y Diamante, 2003).

Algunos lugareños también lo utilizan como fuente de agua dulce, debido a que ahí se bañan y lavan su ropa. El agua también se utiliza para beber, como ejemplo se pueden mencionar los municipios de Santiago Atitlán, San Pedro la Laguna, San Lucas Tolimán y Panajachel, que consumen agua directamente del Lago, con una potabilización mínima, en porcentajes del 55, 25, 95 y 40% respectivamente. También cabe mencionar que para los municipios de Santiago Atitlán, San Lucas Tolimán, San Pedro la Laguna y San Juan la Laguna la pesca y caza de cangrejos es de suma importancia económica (Dix, M. *et al.* 2011).

A nivel ecológico el lago y su cuenca albergan diferentes especies de plantas, peces, aves, reptiles e invertebrados. La base de la cadena trófica de la comunidad de organismos acuáticos presentes en el Lago de Atitlán, es el fito y bacterioplancton. Lo que significa que si la comunidad planctónica se ve alterada, puede llegar a afectar a todo el ecosistema.

En los últimos tres años, en éste lago se han observado altas densidades y frecuencias de la cianobacteria *L. robusta*. Esta cianobacteria no es tóxica, pero también se han observado colonias de la cianobacteria *Microcystis aeruginosa*, que sí es

productora de toxinas. Entre algunos factores que favorecen el crecimiento de estos organismos se pueden mencionar aspectos fisicoquímicos, como los contaminantes que son fuente de nutrientes, como por ejemplo jabones y fertilizantes, luz y altas temperaturas. Estos organismos también se ven favorecidos por características propias de su fisiología, como los son vesículas de gas y por la capacidad de fijación de nitrógeno que tienen algunos de ellos y que les confieren ventajas sobre otros microorganismos fotosintéticos. Géneros como *Microcystis* no son capaces de fijar nitrógeno (Domingo y Romero, 2009).

Existen ciertas especies de fitoplancton que se usan como bioindicadores de condiciones de los cuerpos de agua. Es por esta razón que resulta importante estudiar la caracterización y dinámica presente en el Lago de Atitlán para correlacionarlas con los aspectos fisicoquímicos del mismo. Con esto se pretende generar más conocimientos que permitan controlar las dinámicas entre los factores abióticos y la formación de florecimientos y de densidades elevadas de fitoplancton en el Lago de Atitlán.

C. Objetivos

1. Objetivo general

- a. Determinar si existe una correlación entre nutrientes con fósforo o nitrógeno y la densidad de fitoplancton, *A. granulata*, *L. robusta*, y biomasa desde abril 2010 hasta abril 2012 en el Centro-Weiss G del Lago Atitlán.

2. Objetivos específicos

- a. Determinar si existe un cambio cíclico según la época del año en la densidad de fitoplancton, biomasa y nutrientes.
- b. Determinar si los nutrientes fosforados o los nitrogenados son los limitantes en las dinámicas fitoplanctónicas.
- c. Obtener el estado trófico del Lago Atitlán desde abril 2010 hasta abril 2012 según índice de Carlson.

D. Hipótesis

1. Investigación

Hi: Existe una correlación positiva entre el cambio de la concentración de nutrientes con fósforo o nitrógeno y el cambio en la densidad de fitoplancton, *A. granulata*, *L. robusta*, y biomasa.

2. Nula

Ho: No existe una correlación positiva entre el cambio de la concentración de nutrientes con fósforo o nitrógeno y el cambio en la densidad de fitoplancton, *A. granulata*, *L. robusta*, y biomasa.

3. Alternativa

Ha: No existe una correlación entre el cambio de la concentración de nutrientes con fósforo o nitrógeno y el cambio en la densidad de fitoplancton, *A. granulata*, *L. robusta*, y biomasa.

II. MARCO METODOLÓGICO

A. Procedimientos

1. Descripción del área de estudio

Figura 7 Ubicación del Lago Atitlán en Guatemala

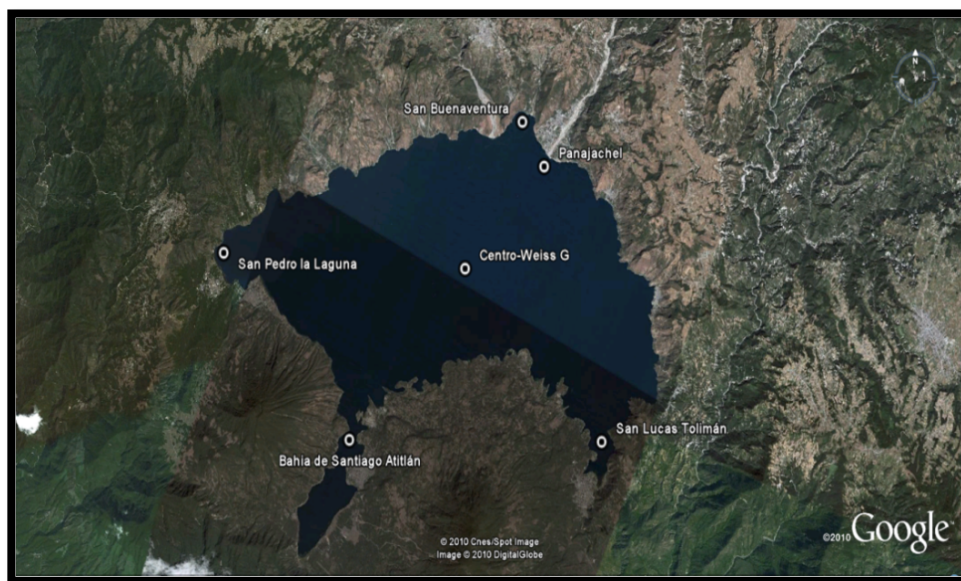


(Modificado de Obando, *et al.* 2008)

En la figura se puede observar que el Lago Atitlán está situado en el municipio de Sololá en el suroccidente de Guatemala.

El Lago Atitlán está ubicado en la sierra volcánica al oeste de Guatemala en una caldera formada aproximadamente hace aproximadamente 85,000 años. Está ubicado a 1565msn, con un volumen de 24km^3 y un área superficial de 137km^2 . Su profundidad máxima es de 350m y la promedio de 188m. La cuenca del lago está conformada aproximadamente por un 46% de bosque y 32% de agricultura (frijoles, cebolla, papa y café). Cuenta con aproximadamente 400,000 habitantes en 541km^2 . Esta cuenca forma parte de RUMCLA (Reserva de Usos Múltiples de la Cuenca del Lago Atitlán) (Dix, *et al.* 2011 y Rejmánková, *et al.* 2011).

Figura 8 Imagen satelital del Lago de Atitlán



(Google Earth ©; Laboratorio de Análisis y Monitoreo, CEA)

En la imagen se muestra el sitio de muestreo en este estudio, ubicado en el centro-Weiss G. Se pueden observar también otros puntos de muestreo importantes como lo son San Pedro la Laguna, Panajachel, San Buenaventura, San Lucas Tolimán y Bahía de Santiago Atitlán.

2. Análisis de ortofosfato, nitratos, nitritos, amonio y transparencia. Se realizó una revisión de la base de datos del estado del Lago de Atitlán, según Dix, *et al.* 2012 donde estos parámetros fisicoquímicos habían sido previamente reportados, para los años del 2010 y 2011. Para los datos del 2012, se obtuvieron directamente de la base de datos de la Dra. Margaret Dix.

3. Toma de muestras. Para los análisis de fósforo total y clorofila *a*, se tomaron muestras por medio de una botella de *Van Dorn* a diferentes profundidades, para ser posteriormente filtradas y analizadas. Las muestras fueron transportadas en frascos plásticos herméticos previamente lavados con una solución de HCl 0.1M.

4. Análisis de fósforo total. La concentración de fósforo es proporcional al color de la muestra cuando se analiza por medio de espectrofotometría. Se recomienda realizar la digestión con persulfato, en lugar de ácido sulfúrico. Los arseniatos pueden causar interferencias en concentraciones superiores a 100µg/L, debido a que reaccionan con el molibdato produciendo un color azul, similar al que se forma con el fosfato. El cromo hexavalente y el nitrato también ocasionan interferencias, pero en este caso, negativas. Éste método es aplicable a concentraciones entre 0 y 500µg/L, con un límite de detección de 2.00 µg/L, tiene una precisión de ±0.5µg/L, utilizando 20mL, con un nivel de confianza del 99% (CEA, 2010).

Las muestras se analizaron sin filtrar y se preservaron a -20°C. Se utilizó una celda de 5cm de largo, adaptada de un cromatografo de gases. Todo el material que se utilizó se desaguó con agua ultra pura 3 veces, posteriormente se dejó reposar *overnight* en HCl 0.1M, se autoclaveó por 15 minutos a 250°F con HCl 0.1M. (CEA, 2010).

Como primer paso, se midieron 20.0mL de la muestra en un tubo de ensayo, con tapón de rosca, totalmente limpio. Se añadieron 8.0mL de una solución preparada el mismo día, compuesta 1:1, por ácido sulfúrico 0.45M y persulfato de potasio al 0.4% (p/v). Se agitó en vortex por un mínimo de 30 segundos y posteriormente se autoclaveó a 240°F durante 15 minutos. Las muestras se dejaron enfriar y se añadieron 375µL de NaOH 10.8N. Nuevamente se agitó en vortex por un mínimo de 30 segundos. Se añadieron 2.0mL de una solución al 12.2% (v/v) ácido sulfúrico, 1.05% (p/v) molibdato de amonio y 0.03% (p/v) tartrato de antimonio y potasio. Se agitó en el vortex por al menos 30 segundos. Se añadieron 0.2mL de una solución al 3% (p/v) de ácido ascórbico disuelto en agua. Se agitó en vortex por 30 segundos. Se incubó a temperatura ambiente por 20 o 30 minutos, hasta que apareció un color azul (CEA, 2010).

Las lecturas de absorbancia se realizaron a 675nm u 880nm. Se prepararon 5 estándares de fósforo en concentraciones de 50 hasta 350 $\mu\text{g/L}$, utilizando fosfato de sodio dihidrogenado, previamente secado en horno a 110°C. Se preparó un blanco, que contenía los mismos reactivos que la muestra a analizar, pero no el sustrato. El blanco se corrió en duplicado, al igual que el 5% de las muestras (CEA, 2010).

Para determinar la concentración de fósforo se realizó una curva de calibración (Absorbancia vs. Concentraciones de fósforo). Se calculó el coeficiente de determinación R^2 , ordenada al origen, y la pendiente (CEA, 2010).

5. Análisis de clorofila. Se filtró un volumen conocido del agua a analizar por un filtro de fibra de vidrio (GF/F), posteriormente se dobló por la mitad (con el filtrado por dentro) y se almacenó congelado a 4°C en un sobre de papel aluminio por lo menos una noche. Una vez congelados, los filtros se colocaron en contenedores oscuros y se añadieron 20mL de metanol al 100%. Se mezclaron por inversión 3 veces y se almacenaron en el refrigerador entre 4 y 48 horas. Para realizar la lectura se pipetearon 3mL de la muestra en una celda de 1cm, se realizó la lectura y se añadieron 50 μL de HCl 2N. Se dejó un lapso de 90 segundos y nuevamente se realizó otra lectura. Todas las muestras se leyeron a 664, 665 y 750nm, acidificadas y leídas nuevamente a dichas longitudes de onda. A continuación se muestran las ecuaciones para obtener la concentración de clorofila (CEA, 2010).

$$Chl \alpha = \frac{10^3 e(A665)k}{78.74Vl}$$

(Summers, 2012 y HELCOM, 2012)

(Ecuación No.1)

Donde:

- e = Volumen del metanol en cm³
- A(665k) = Absorbancia a 665nm menos la absorbancia a 750nm.
- l = largo de la celda en cm
- V = volumen de agua filtrada en dm³
- 78.74 = Coeficiente de absorción en metanol

6. Análisis de fitoplancton

a. Análisis cualitativo. Las jaladas verticales fueron observadas directamente en portaobjetos usando magnificaciones de 40x hasta 400x. La clasificación del fitoplancton se realizó según Komárek y Hauer, 2010, Edlund, *et al.* 2010, Oyadmari, 2010, Prescott 1970 y Smith, 1950. Adicionalmente, se trabajó en colaboración con la Dra. Margaret Dix, MSc. Jana Veselá y Dr. Jiří Komárek. Se tabularon los datos para los filos, órdenes y géneros o especies identificados.

b. Análisis cuantitativo. Las muestras obtenidas utilizando la botella de *Van Dorn* se analizaron utilizando una celda Sedgewick Rafter y se contó el volumen necesario para obtener por lo menos 100 organismos, por medio de microscopía óptica utilizando una magnificación de 400x. Este procedimiento se repitió 3 veces para asegurar que no hubiera variaciones significativas.

Se consideró como un organismo a una colonia, un filamento o una célula, dependiendo de la morfología del sujeto de estudio. En base a estos resultados se obtuvo la abundancia (organismos/L).

B. Análisis estadístico

Los resultados de los análisis de fitoplancton y de los nutrientes con nitrógeno o fósforo fueron correlacionados con el objetivo de obtener información sobre la dinámica y composición de la comunidad de fitoplancton presente en el Lago de Atitlán y su relación con factores abióticos. Se trabajaron los siguientes análisis de datos para visualizar mejor las relaciones dentro de la comunidad fitoplanctónica:

1. Regresión lineal múltiple. Se realizó una regresión lineal múltiple para correlacionar la densidad de organismos totales, de *A. granulata*, de *L. robusta* y biomasa con fósforo total, orotofosfatos, nitratos, amonio y razón N:P. Se utilizó el programa “PAST Versión 2.17”: Hammer, Ø; Harper, A. y Ryan, P. 2012. PAlaeontological STatistics Version 2.17. Univesity of Oslo y Geological Museum, Copenhagen. Suecia.

Se consideró que los datos se ajustaron al modelo planteado cuando el coeficiente de determinación $R^2 > 0.7$. Otro parámetro que se consideró es el valor p, cuando $p \leq 0.05$, se rechazó la hipótesis nula y se concluyó que los valores sí estaban relacionados.

2. Regresión lineal simple. Se realizó una regresión lineal simple para comparar los resultados obtenidos por medio de microscopía para organismos totales, de forma cruda y logarítmica, con los resultados obtenidos para biomasa utilizando el programa “PAST Versión 2.17”: Hammer, Ø; Harper, A. y Ryan, P. 2012. PAlaeontological STatistics Version 2.17. Univesity of Oslo y Geological Museum, Copenhagen. Suecia.

Se consideró que los datos se ajustaron al modelo planteado cuando el coeficiente de determinación $R^2 > 0.7$. Otro parámetro que se consideró es el valor p, cuando $p \leq 0.05$, se rechazó la hipótesis nula y se concluyó que los valores sí estaban relacionados.

3. Análisis del estado trófico del Lago Atitlán

a. Índice de Carlson. Se utiliza para medir estado trófico del lago. Se calculó utilizando tres parámetros: transparencia, clorofila y fósforo total. El estado trófico (P) cambia los niveles en biomasa (clorofila) y esto afecta la transparencia (Disco Secchi).

Se utilizó una transformación de los valores del disco Secchi, como medida de la biomasa, en una escala de 0 a 110. Cada aumento de diez unidades, representa un aumento del doble. Útil para comparar regiones o tiempos. Está diseñado para ser utilizado en lagos con pocas plantas acuáticas con raíces y una pequeña turbidez ocasionada por algas (EPA, 2010).

$$\text{TSI} = 60 - 14.41 \ln(\text{Disco Secchi en m}) \text{ (Ecuación No.2)}$$

$$\text{TSI} = 9.81 \ln(\text{Clorofila a en ug/L}) + 30.6 \text{ (Ecuación No.3)}$$

$$\text{TSI} = 14.42 \ln(\text{Fósforo total en ug/L}) + 4.15 \text{ (Ecuación No.4)}$$

Donde:

TSI = Índice de estado trófico de Carlson, por sus siglas en inglés.

ln = Logaritmo natural

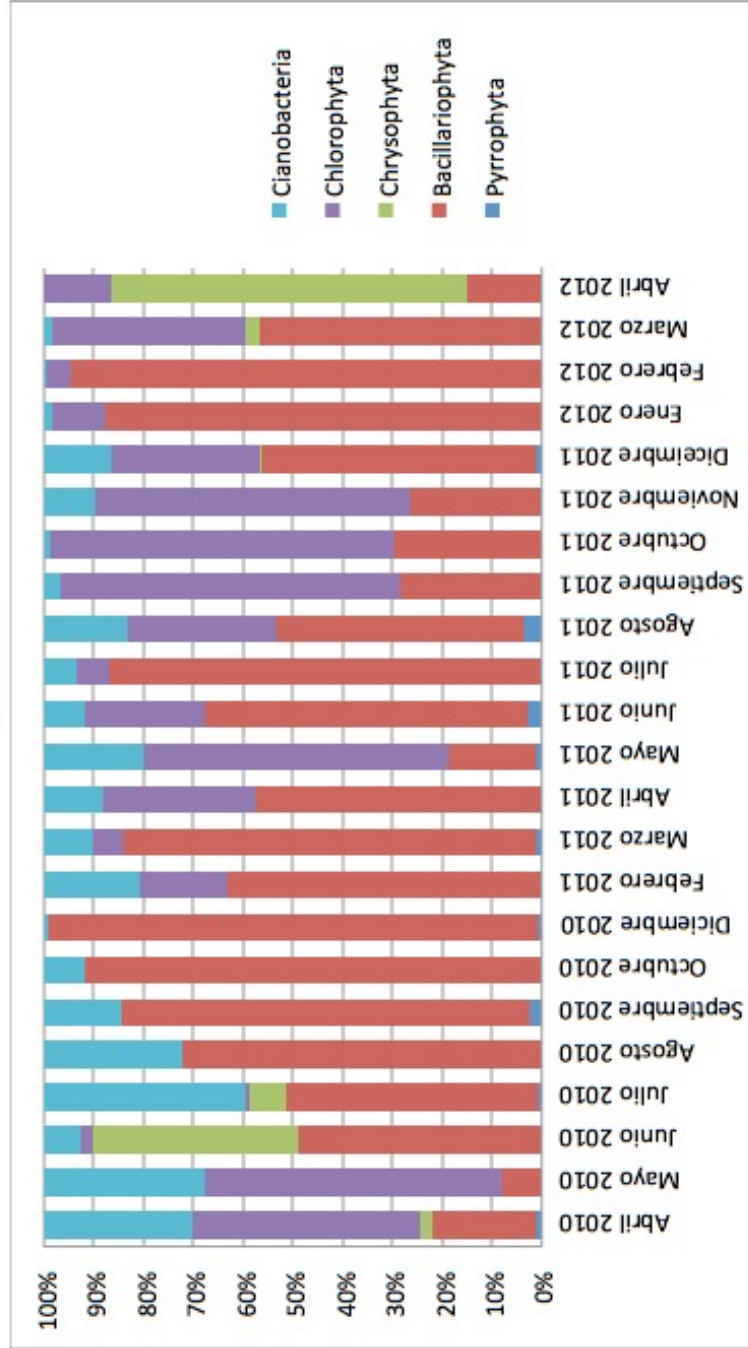
III. RESULTADOS

Cuadro 6 Abundancias relativas de los géneros dominantes de fitoplancton durante el período de muestreo en el epilimnio, Lago Atitlán durante el presente período de estudio

Mes	Género	Porcentaje
Abril 2010	<i>Sphaerocystis</i>	45.5
Mayo 2010		58.3
Junio 2010	<i>Dinobryon</i>	41.3
Julio 2010	<i>Aulacoseira</i>	46.5
Agosto 2010		67.0
Septiembre 2010		75.1
Octubre 2010		91.2
Diciembre 2010		97.7
Febrero 2011	<i>Coscinodiscus</i>	50.9
Marzo 2011		62.2
Abril 2011	<i>Fragilaria</i>	37.4
Mayo 2011	<i>Staurastrum</i>	54.9
Junio 2011	<i>Fragilaria</i>	42.9
Julio 2011		70.6
Agosto 2011	<i>Aulacoseira</i>	28.2
Septiembre 2011	<i>Mougeotia</i>	65.6
Octubre 2011		67.9
Noviembre 2011		37.0
Diciembre 2011	<i>Aulacoseira</i>	47.3
Enero 2012		84.9
Febrero 2012		92.3
Marzo 2012		37.3
Abril 2012	<i>Dinobryon</i>	71.5

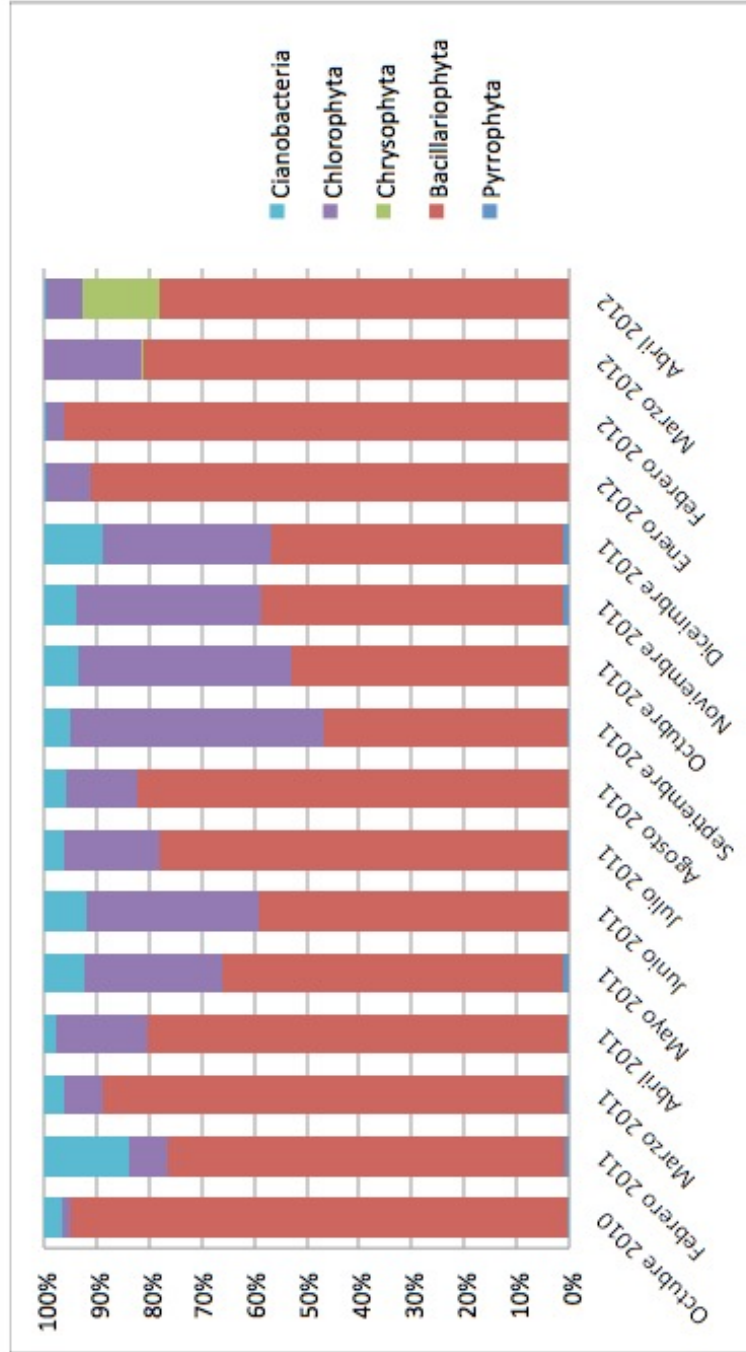
El cuadro muestra la sucesión de organismos fitoplanctónicos durante el período muestreado. Se puede observar que los géneros dominantes pertenecientes a la división Bacillariophyta (diatomeas) fueron *Aulacoseira*, *Fragilaria* y *Coscinodiscus*, a la división Chlorophyta (algas verdes), *Staurastrum*, *Sphaerocystis* y *Mougeotia* y a la división Phaeophyta (algas pardas) el género *Dinobryon*.

Figura 9 Abundancia relativa (%) de los grupos de fitoplancton, Centro Weiss-G, Lago Atitlán desde abril 2010 hasta abril 2012 en el epilimnio



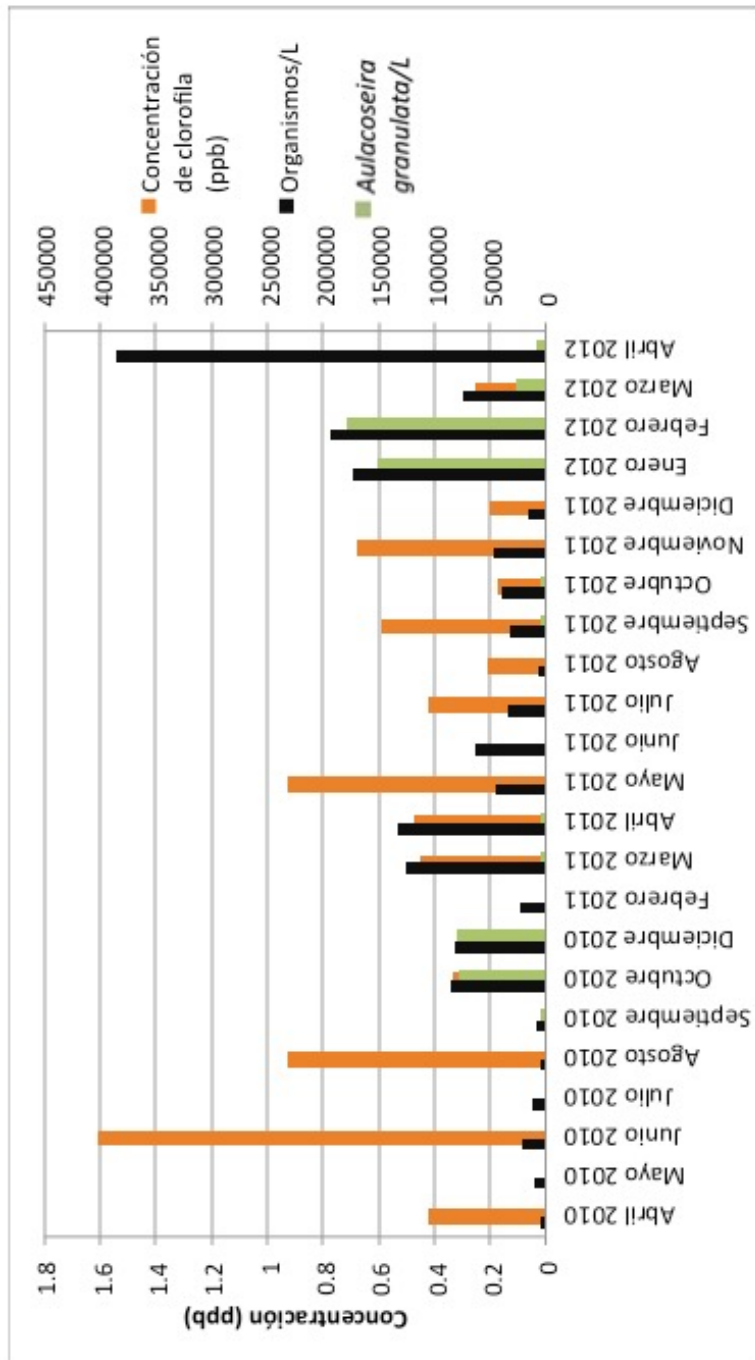
En la figura se observa que en el epilimnio, durante los meses de abril y mayo 2010, mayo, y de septiembre a noviembre 2011 hubo una dominancia de Chlorophyta, mientras que durante los meses de julio a diciembre 2010, de febrero a abril, de junio a agosto, diciembre 2011 y de enero a marzo 2012 se observó una dominancia de Bacillariophyta. El único mes donde se observó dominancia de Chrysophyta fue en abril 2012, debido a la presencia de la especie *D. divergens*, mientras que junio 2010 se observó una codominancia de Chrysophyta y Bacillariophyta.

Figura 10 Abundancia relativa (%) de los grupos de fitoplancton, Centro Weiss-G, Lago Atitlán desde octubre 2010 hasta abril 2012 en el hipolimnion



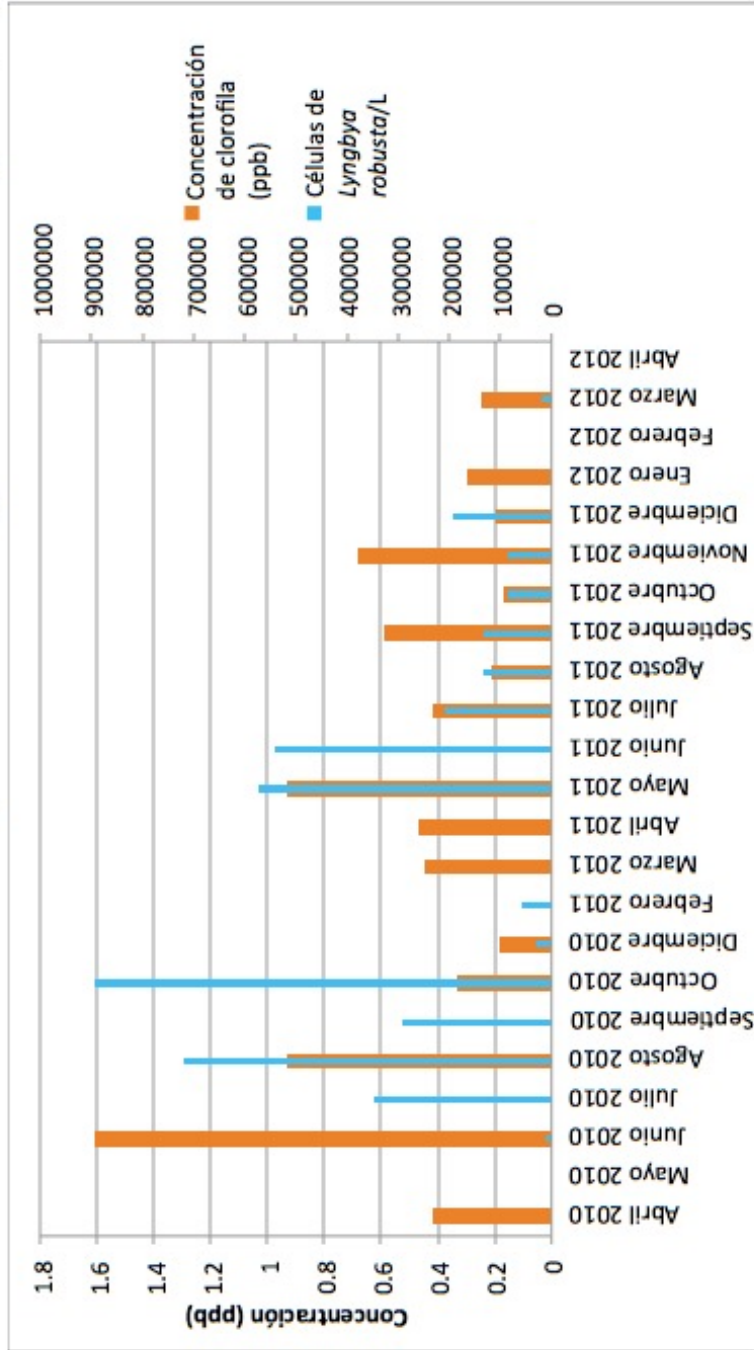
En la figura se puede observar que durante todo el año los organismos pertenecientes al grupo Bacillariophyta fueron los dominantes, a excepción de septiembre y octubre 2011, donde se observó una codominancia de Chlorophyta y Bacillariophyta.

Figura 11 Cambios en las densidades de organismos totales, *A. granulata* y clorofila α durante el periodo muestreado en el epilimnio, Lago Atitlán



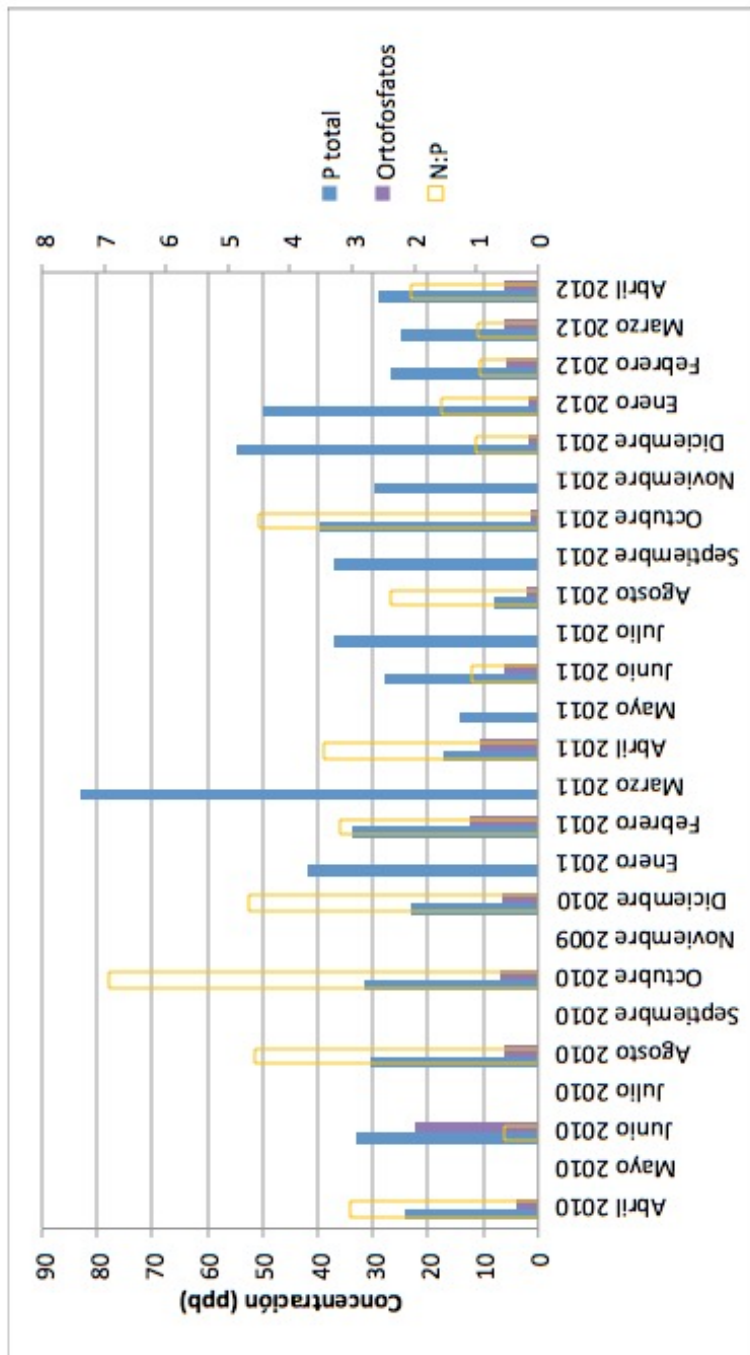
En la figura se puede observar el cambio en la concentración de clorofila α , organismos/L y densidad de *A. granulata* durante el periodo muestreado. En el eje izquierdo se muestra la concentración en ppb de clorofila α , mientras que en el eje derecho el número de organismos/L. Para estas variables no se observó una tendencia cíclica en el periodo muestreado.

Figura 12 Cambios en las densidades de *L. robusta* y clorofila α durante el período muestreado en el epilimnio, Lago Atitlán



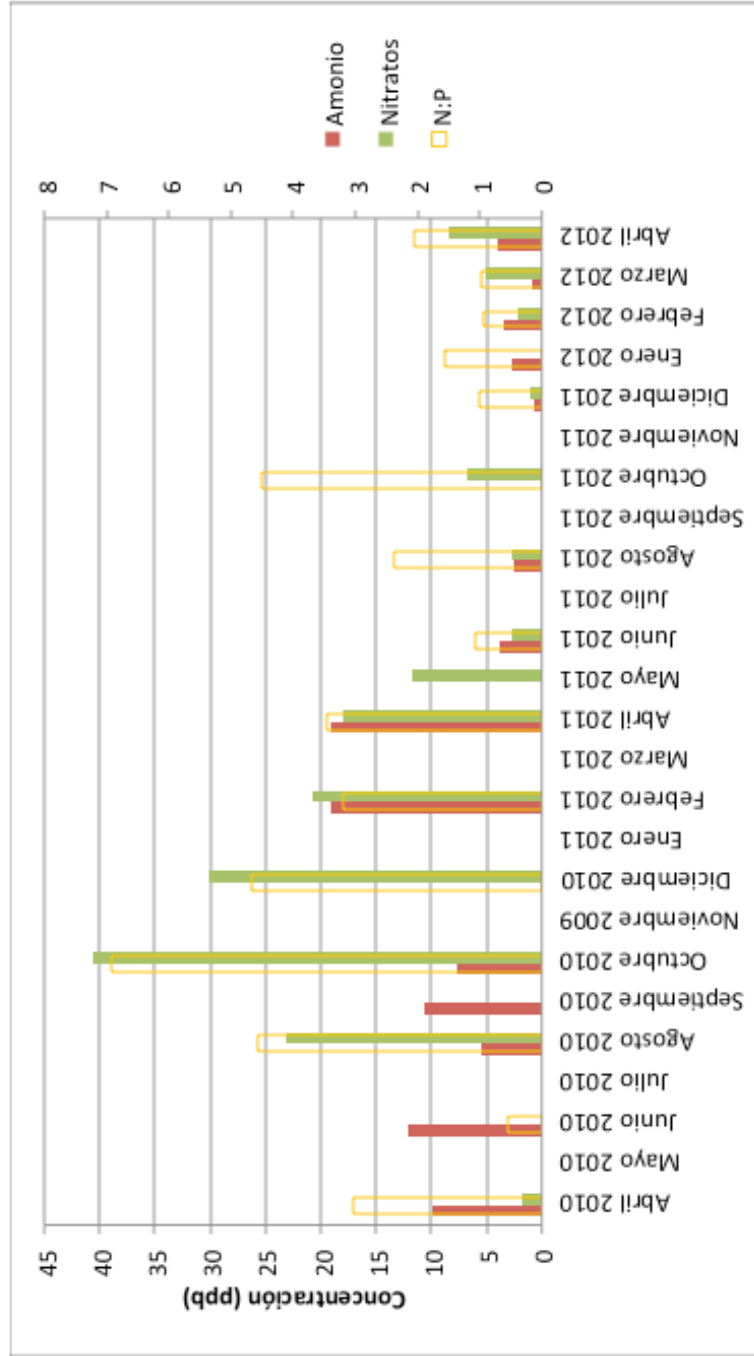
En la figura se muestra el cambio en la concentración de clorofila α en ppb en el eje izquierdo y el número de células/L de *L. robusta* en el eje derecho. Se observó, en 2010 y 2011, que alrededor del mes de julio se dieron las densidades de células más altas de *L. robusta*, aunque menores en el 2011, que las obtenidas para el 2010.

Figura 13 Cambios en la concentración de nutrientes con fósforo y de la razón N:P durante el periodo muestreado en el epilimnio, Lago Atitlán



En la figura se observa en el eje izquierdo la concentración en ppb para los nutrientes fosforados y en el eje derecho la razón N:P. No se observó una tendencia cíclica para los nutrientes, pero para la razón N:P se observaron picos altos en octubre y agosto 2010 y 2011, aunque no se observó el mismo comportamiento para diciembre 2010 y para diciembre 2011.

Figura 14 Cambios en la concentración de nutrientes con nitrógeno y de la razón N:P durante el período muestreado en el epilimnio, Lago Atitlán



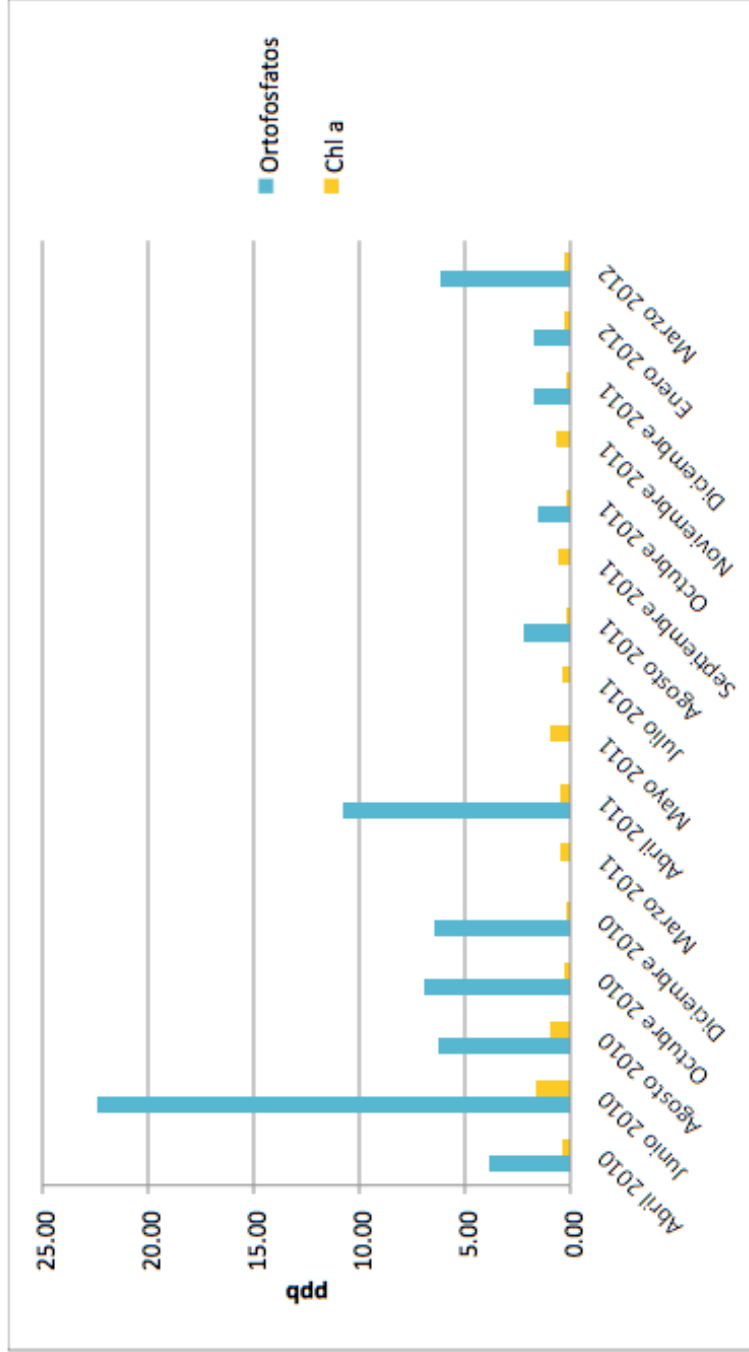
En la figura se observa en el eje izquierdo la concentración en ppb para los nutrientes nitrogenados y en el eje derecho la razón N:P. No se observó una tendencia cíclica para los nutrientes, pero se observó un comportamiento similar en el comportamiento de los nitratos, amonio y razón N:P.

Cuadro 7 Regresión lineal múltiple entre nutrientes, razón N:P y las densidades de *L. robusta*, *A. granulata*, organismos totales y clorofila α en el epilimnio, Lago Atitlán, durante el período de muestreo

Variable dependiente	Variabes independientes e intercepto	Coefficiente	Desviación Estándar	p	R ²
Organismos/L	Intercepto	149110.00	100660.00	0.16	
	P total	304.81	1390.70	0.83	0.01
	Amonio	-413.61	6212.50	0.95	0.02
	Nitratos	4591.30	5499.70	0.42	0.01
	Ortofosfatos	-6408.70	9521.50	0.51	0.01
	N:P	-35420.00	36476.00	0.35	0.02
<i>Lyngbya robusta</i>	Intercepto	203970.00	245280.00	0.42	
	P total	-2635.80	3388.80	0.45	0.03
	Amonio	-17672.00	15138.00	0.26	0.01
	Nitratos	14983.00	13401.00	0.28	0.23
	Ortofosfatos	-2646.10	23201.00	0.91	0.01
	N:P	12210.00	88879.00	0.89	0.23
<i>Aulacoseira granulata</i>	Intercepto	89281.00	55051.00	0.12	
	P total	-36.07	760.57	0.96	0.00
	Amonio	-1209.30	3397.50	0.73	0.06
	Nitratos	4006.40	3007.70	0.20	0.00
	Ortofosfatos	-5430.00	5207.10	0.31	0.04
	N:P	-24319.00	19948.00	0.24	0.00
Clorofila	Intercepto	-0.02	0.30	0.94	
	P total	0.00	0.00	0.86	0.01
	Amonio	-0.02	0.02	0.42	0.20
	Nitratos	-0.02	0.01	0.27	0.01
	Ortofosfatos	0.09	0.03	0.01	0.66
	N:P	0.10	0.10	0.36	0.05

En el cuadro se observan los resultados para la regresión múltiple realizada entre los nutrientes, el fitoplancton y la clorofila α . Se observó que la única correlación significativa fue la de la clorofila α con ortofosfatos, debido a que se observó un coeficiente de determinación múltiple (R²) aproximadamente igual a 0.7 y un $p < 0.05$.

Figura 15 Concentración de clorofila α y de ortofosfatos (PO_4^{3-}) en el epilimnio, Lago Atitlán durante el período muestreado



En la figura se observan las concentraciones de clorofila α y ortofosfatos (PO_4^{3-}) determinadas durante el período de muestreo. En esta gráfica se observa la similitud en el comportamiento de ambos. Ambos tuvieron su mínima concentración durante el mes de octubre 2011 y la máxima en el mes de junio 2010.

Cuadro 8 Regresión lineal simple entre la concentración de clorofila y la densidad de organismos fitoplanctónicos totales durante el período muestreado en el epilimnio, Lago Atitlán

Densidad de fitoplancton e intercepto	Coeficiente	Desviación Estándar	p	R²
Intercepto	0.13	1.79	0.94	
Organismos/L	0.00	0.00	0.48	0.07
Log Organismos/L	0.12	0.44	0.78	0.04

En el cuadro se observa la correlación entre la concentración de clorofila, la densidad de organismos fitoplanctónicos, de forma cruda y logarítmica. No se observa una correlación significativa con ninguna de las 2 densidades, debido a que ningún coeficiente de determinación fue igual o mayor a 0.7 y p no fue inferior a 0.05.

Cuadro 9 Estado trófico del Lago Atitlán en el epilimnio durante el período de muestreo según el Índice de Carlson

Mes	Clorofila α	P total	Transparencia (m)
Abril 2010	22.10	50.12	26.12
Mayo 2010			33.25
Junio 2010	35.28	54.62	37.10
Julio 2010			36.24
Agosto 2010	29.91	53.38	34.18
Septiembre 2010			38.65
Octubre 2010	19.72	53.93	40.02
Diciembre 2010	13.78	49.38	38.33
Enero 2011		58.01	
Febrero 2011		54.92	36.52
Marzo 2011	22.77	67.87	33.48
Abril 2011	23.19	45.21	35.97
Mayo 2011	29.89	42.54	38.33
Junio 2011		52.08	32.59
Julio 2011	22.09	56.27	38.98
Agosto 2011	15.29	34.30	34.18
Septiembre 2011	25.42	56.28	34.92
Octubre 2011	13.22	57.17	41.15
Noviembre 2011	26.82	53.11	37.40
Diciembre 2011	14.81	61.86	40.02
Enero 2012	18.79	60.54	41.54
Febrero 2012		51.63	34.79
Marzo 2012	17.00	50.54	31.76
Abril 2012		52.62	34.06

En el cuadro se puede observar el estado trófico en el centro del Lago indicado por las tres variables utilizadas por el Índice de Carlson. Los resultados que indican que lago es oligotrófico se muestran en color amarillo, los que indican que es mesotrófico en verde y eutrófico en azul. Se puede observar que la clorofila y la transparencia tienden a indicar oligotrofia (0 y 40) y mesotrofia (más de 40 y 50), mientras que el fósforo tiende a indicar eutrofización.

Cuadro 10 Estado trófico del Lago Atitlán en el epilimnio durante el período de muestreo según parámetros adaptados de Vollenweider

Parámetro	Valor estadístico	Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico	Lago Atitlán	
P total (ppb)	Promedio	8	26.7	84.4	33.21	M
	Rango	3.0 - 17.7	10.9 - 95.6	16 – 386	8.09-83.01	
Clorofila α (ppb)	Promedio	1.7	4.7	14.3	0.51	O
	Rango	0.3 - 4.5	3 – 11	3 – 78	0.17-1.61	
Transparencia (m)	Promedio	9.9	4.2	2.45	5.43	O-M
	Rango	5.4 - 28.3	1.5 – 8.1	0.8 – 7.0	3.60-10.50	

(Wetzel, 2001)

En el cuadro se muestran los resultados para el estado trófico del Lago, según Vollenweider, donde O = oligotrófico, M = mesotrófico y E = eutrófico. Estos resultados al igual que el índice de Carlson, muestran que el fósforo indica más productividad, debido a que fue el único donde no se clasificó el lago como oligotrófico (aunque sí hubo meses donde mostró oligotrofia como se muestra en el número mínimo del rango). Los resultados para transparencia, al igual que para el índice de Carlson, también sitúan al lago entre oligotrófico y mesotrófico. Los resultados para clorofila también mostraron la misma clasificación que el Índice de Carlson (oligotrofia).

IV. DISCUSIÓN

El epilimnio, es la zona que se da cuando un lago está estratificado, donde ocurre la fotosíntesis y está en constante mezcla. Los valores de todas las variables presentadas en este estudio son el promedio de las lecturas obtenidas en por lo menos dos de las siguientes de las profundidades: 0m, 5m, 10m, 15m, 20m, 25m y 30m (en caso de sólo haber una lectura se utilizó únicamente ese dato).

Se observó que en esta área del Lago Atitlán, en los diferentes meses del período de evaluación (abril 2010 a abril 2012), fueron dominantes 3 de las 5 divisiones de fitoplancton observadas: Bacillariophyta, Chlorophyta y Chrysophyta, que como se puede observar en el Cuadro 6 están influenciadas por la presencia de los géneros dominantes *Aulacoseira*, *Fragilaria* y *Coscinodiscus* en el caso de Bacillariophyta, *Staurastrum*, *Sphaerocystis* y *Mougeotia* para *Chlorophyta* y *Dinobryon* para Phaeophyta.

Los géneros presentados en el Cuadro 6, no necesariamente tienen que pertenecer a la división dominante mostrada en el Figura 9, debido a que pueden haber varios géneros no dominantes que sumados den un porcentaje superior que el del género dominante, lo que haría que su división fuera la dominante, a pesar de que el género dominante no pertenezca a ella.

El hipolimnio es la parte más profunda, donde no ocurre fotosíntesis, ni mezcla de aguas, debido a que el agua es más densa y el viento no logra mezclarla, por lo que se mantiene por debajo del agua que comprende el epilimnio. Se observó que la mayor parte del año estuvo dominada por Bacillariophyta (Figura 10). Estos resultados sugieren que este grupo de organismos es menos sensible a la falta de luz que las Chlorophyta y Chrysophyta o que en partes más profundas hay más acceso a nutrientes indispensables para la reproducción de las Bacillariophyta, como podría ser el silicio.

Otro factor que pudo haber influido en este resultado es que las Bacillariophyta tienden a ser más pesadas que otros organismos fitoplanctónicos, debido a que poseen

una pared celular de sílice, por lo que sus células caen por gravedad a zonas más profundas. Estas paredes celulares son muy resistentes, por lo que después de que la célula muere, mantienen su forma, lo que pudo haber ocasionado que se cuantificara células que ya habían muerto previamente a la fijación en lugol.

En los meses de octubre y septiembre se observó una codominancia de Bacillariophyta con Chrysophyta, debido a los altos porcentajes del género *Mougeotia*. Éste resultado sugiere que previo estos meses hubo una mezcla de agua, donde hubo una distribución de nutrientes y que hubo una mayor transparencia para que la luz pudiera penetrar más profundamente y que se pudiera llevar a cabo la fotosíntesis o que debido a esta misma mezcla, los organismos superficiales, como *Mougeotia*, se hayan encontrado más profundamente. Todos los demás grupos se observaron en ambas partes del lago.

En la Figura 11 se puede observar el cambio en la concentración de clorofila y densidad de *A. granulata* y organismos/L durante el período muestreado. Se consideró como un organismo las colonias o las células individuales, tanto de organismos coloniales, como unicelulares. No se observó una tendencia cíclica de estas variables en el período muestreado. Se sugiere analizar el comportamiento de estas variables en un período de tiempo más grande, para determinar si los patrones en el comportamiento requieren más de dos años para repetirse.

En la Figura 12 se muestra el cambio en la concentración de clorofila α en ppb y el número de células/L de *L. robusta*. Con el objetivo llevar un mejor control de los florecimientos, que se definen como número de células por volumen de agua, los tricomas de *L. robusta* se clasificaron en tres rangos para lograr obtener un valor aproximado del número de células presentes en un volumen de agua durante el muestreo: rango pequeño, que comprendía filamentos de 1 a 100 células, mediano que eran filamentos que desde las 101 hasta 300 células y los grandes, que son los mayores a 300 células. Para obtener el número de células por volumen de agua, se multiplicó la cantidad de filamentos encontrados en cada categoría, por 50, 200 o 300, para pequeño, mediano o grande, respectivamente.

Se observó que hubo un incremento en la población de *L. robusta*, seguido por valles, que indican la disminución de la misma, alrededor del mes de julio en 2010 y en 2011. En el 2010 se observó este comportamiento desde julio hasta octubre y en el 2011 de mayo a julio. En el 2010 se observaron densidades mayores a las del 2011, probablemente debido a que fue el periodo posterior a la tormenta Agatha, lo que incrementa la cantidad de nutrientes en el Lago y favorece el crecimiento de cianobacterias. No se observó un patrón en el comportamiento de clorofila α .

Una de las razones que pudo haber influido en las mediciones de concentración de clorofila α fue que si la absorbancia era menor 0.1 se debió haber utilizado una celda más larga, pero únicamente se contaba con una celda 1cm de largo y una celda cilíndrica de 5cm de largo, adaptada de un cromatografo de gases, para la cual no se contaba con las especificaciones de su uso en espectrofotometría. Otro factor que pudo haber influido en los resultados, a pesar de que se hizo la corrección con la lectura a 750nm, es que los restos de fibra de vidrio del filtro se hayan mezclado con la muestra, formando partículas en suspensión, debido a que no se disuelven y esto haya causado interferencias en el paso del haz de luz del espectrofotómetro.

En la Figura 13 se observa la concentración para los nutrientes fosforados y la razón N soluble: P soluble. La razón N soluble: P soluble es el cociente que se obtiene al dividir la suma de las concentraciones de amonio (NH_4^+) y nitratos ($\text{NO}_3^{2-} + \text{NO}_2^{3-}$) entre la concentración ortofosfatos (PO_4^{3-}). No se observó una tendencia cíclica para los nutrientes, pero para la razón N soluble: P soluble se observaron picos altos en octubre y agosto 2010 y 2011, aunque no se observó el mismo comportamiento para diciembre 2010 y diciembre 2011. Nuevamente las lecturas obtenidas para el 2010 fueron más altas que las 2011, lo que sugiere que la concentración de nutrientes aumentó debido a la tormenta Agatha.

Una vez se logró estandarizar el uso de la celda de 5cm, se utilizó para analizar las concentraciones de fósforo total en las muestras. Al utilizar esta celda se debe verificar que no queden burbujas, ni aire en el cilindro por el que pasa el haz de luz. A pesar de haber lavado la cristalería con ácido clorhídrico 0.1M y haberla autoclaveado con el mismo, dada la sensibilidad del método, la más mínima contaminación con fosfatos

pudo haber influido en los resultados, otro factor limitante fue que no se contaba con una celda más larga, para leer las muestras de menor concentración. Se recomienda que para los valores de extremos de la concentración, los estándares sean lo más cercanos posible a los de las muestras que se están analizando, para que la curva de calibración sea lo más acorde a los valores reales posible. Otro factor que pudo haber influido en los resultados es que no todas las muestras de la misma fecha se analizaron el mismo día, por lo que pudieron haber variaciones en el método o en el equipo, que pudieron haber aumentado o disminuido las lecturas del espectrofotómetro para obtener la concentración.

En la Figura 14 se observa la concentración de nutrientes nitrogenados y la razón N soluble: P soluble. No se observó una tendencia cíclica para los nutrientes, pero se observó un comportamiento similar en el comportamiento de los nitratos, amonio y razón N soluble: P soluble. Este comportamiento se da debido a que la razón N soluble: P soluble es directamente proporcional a la suma de nitratos y amonio,

Se realizó una correlación múltiple entre los nutrientes (nitratos, ortofosfatos, amonio y fósforo total), razón N soluble: P soluble y las medidas de fitoplancton obtenidas por medio de microscopía y por medio de clorofila α (ver Cuadro 7). El único factor donde se obtuvo una correlación significativa fue el de la clorofila con ortofosfatos, donde se obtuvo un coeficiente de determinación múltiple, R^2 , de aproximadamente 0.7 y un $p=0.01$. Para que se considere como una relación significativa el coeficiente de determinación múltiple debe ser igual a 0.7 o mayor y p menor a 0.05, por lo que se considera una correlación aceptable. Se obtuvo un coeficiente igual a 0.09, lo que indica una correlación positiva.

Este resultado sugiere que los ortofosfatos, que son el fósforo soluble presente en el agua, están directamente relacionados con la clorofila debido a que el fitoplancton toma el fosfato del agua para realizar sus funciones metabólicas, mientras que la clorofila α representa la biomasa fotosintética de estos microorganismos, por lo que están directamente relacionados: mientras más ortofosfatos disponibles haya, más fosfato pueden tomar los microorganismos para reproducirse y aumentar la concentración de clorofila α . Este comportamiento se muestra en la Figura 15. Según la literatura

(Istvanovics, 2008) el fósforo es el nutriente que controla a los organismos fitoplanctónicos con clorofila α .

Dado que esta correlación era de esperarse, este resultado puede ser un indicador que medir clorofila α puede ser una mejor representación de la medida de organismos totales de fitoplancton, que por medio de microscopía, ya que con las lecturas obtenidas por medio de microscopía no se obtuvo ninguna correlación significativa.

Otro factor que apoya esta suposición es que las desviaciones estándar obtenidas para los datos de clorofila α son mucho más pequeñas, por un mínimo de 7600 veces, que las obtenidas para las otras medidas (microscopía). Este número representa el cociente de la desviación estándar más pequeña de los resultados obtenidos por medio de microscopía y la más grande obtenida a partir de los resultados de clorofila. Este resultado indica que los valores para clorofila α son más precisos.

El hecho de que no se haya observado una correlación entre nutrientes nitrogenados y *L. robusta* puede ser debido a que este organismo es capaz de fijar nitrógeno, por lo que no requiere la presencia de éste en el agua. Esta situación también pudo haber influido en que tampoco se haya observado una correlación entre organismos totales y clorofila α (debido a que estos factores incluyen a esta cianobacteria) con nutrientes nitrogenados.

Respecto a *A. granulata*, se puede decir que es probable que existan otros factores que son los que determinan su crecimiento, como por ejemplo silicio, por lo que no se observó una relación directa de esta especie con los nutrientes nitrogenados. Se recomiendan realizar otros análisis, con otros nutrientes para determinar qué es lo que define el comportamiento de éste organismo.

Cuando la proporción N soluble: P soluble es menor a 7 (lo que indica exceso de fósforo) se ve favorecido el crecimiento de las cianobacterias, así mismo también se necesita una concentración mínima de 8ppb de ortofosfatos para que las nitrogenasas (enzimas involucradas en la fijación de nitrógeno) realicen su función (Díaz *et al.* 2007). Durante el período de muestreo no se observó una proporción N soluble: P soluble superior a 7, pero únicamente en 3 meses (junio 2010, febrero 2011 y abril 2011) se observó una concentración superior a 8ppb de ortofosfatos, mientras que los mayores

porcentajes relativos de cianobacterias se dieron en abril, mayo y julio 2010. Probablemente por esta razón no se observó una correlación entre N soluble: P soluble con cianobacterias, ni con organismos totales (dado que estos incluyen cianobacterias), ni una abundancia relativa alta de cianobacterias durante el período muestreado.

Así mismo, se realizó una correlación entre organismos totales, en forma cruda y logarítmica, con clorofila α (Cuadro 8). No se observó ninguna correlación, que es lo que teóricamente se esperaba. Esto puede ser debido a las fuentes de error en el método de medición de clorofila descritas previamente o que existan organismos que realizan fotosíntesis utilizando clorofila α que se desintegran en presencia del lugol o que no se contaron por medio de microscopía, ya sea debido a su tamaño pequeño, o porque pasaron a través del papel filtro al momento de la filtración.

Otra fuente de error pudo haber sido la presencia de clorofila en el lago proveniente de otras fuentes no fitoplanctónicas, como por ejemplo células vegetales. También pudo haber influido en estos resultados que no se eliminó la feofitina de las lecturas de clorofila, ya que esta molécula es similar a la clorofila, pero inactiva fotosintéticamente, debido a que no posee el átomo de magnesio.

En el Cuadro 9 se observa el estado trófico del Lago Atitlán obtenido por medio del Índice de Carlson, que utiliza las variables fósforo total, clorofila y transparencia. Se observó que la clorofila y la transparencia tienden a mostrar valores oligotróficos (<40) y mesotróficos (entre 40 y 50), mientras que el fósforo total, eutrófico (>50). El hecho de que los resultados de transparencia y clorofila sean similares va acorde con lo que indica la teoría debido a que mientras haya más densidad de organismos, la transparencia será menor, ya que están inversamente correlacionadas.

El hecho de que los resultados con fósforo total indiquen eutrofización, y las otras dos variables no, indica que la cantidad de fósforo en el agua es suficiente para que se desarrollen más microorganismos, pero existe un factor limitante, como podría ser el nitrógeno que no permite que todo este fósforo sea utilizado. Puede ser por esta razón que no se haya observado una correlación entre el fósforo total y fitoplancton. En Dix *et al.* 2012 se muestra que la mayor concentración de nitrógeno total (152ppb) desde

octubre 2009 hasta diciembre 2011, estuvo fuera del rango para clasificar al Lago como oligótrofico, debido a que el valor mínimo en dicho rango es de 307ppb, lo que respalda la afirmación anterior.

En el Cuadro 10 se muestran los resultados para el estado trófico del Lago, según Vollenweider. Al igual que Carlson, estos indican que hay un exceso de fósforo comparado con la biomasa fotosintética, debido a que fue la única variable donde no se pudo clasificar al Lago como oligotrófico, aunque como se puede observar en el valor mínimo sí hubieron meses donde esta variable mostró poca productividad. Respecto a clorofila α , tanto el promedio, como ambos extremos del rango, clasificaron el lago como oligotrófico, al igual que los resultados obtenidos por medio del Índice de Carlson. Los valores mínimos de clorofila indicaron menos productividad que el valor más bajo según Vollenweider para ser clasificado como oligotrófico. Una de las razones para este resultado podría ser que se incluyeron valores para obtener el promedio de clorofila en el epilimnio de profundidades donde ya no llegaba la luz, por lo que no fueron productivas y esto causó que el promedio disminuyera. Los resultados de transparencia, al igual que Carlson indicaron que el Lago se clasifica entre mesotrófico y oligotrófico variando según la época del año. Esta variación está relacionada a los cambios en la densidad del fitoplancton, por lo que para comprender los cambios mensuales en la transparencia, hay que estudiar los cambios en la densidad del fitoplancton.

V. CONCLUSIONES

- A. En el epilimnio se observaron 3 de las 5 divisiones como dominantes en diferentes épocas del período muestreado, mientras que el hipolimnio, en la mayoría del tiempo se observaron cómo dominantes las Bacillariophyta.
- B. No se observó un comportamiento cíclico en el comportamiento de la concentración de ortofosfatos, nitratos, amonio, fósforo total, clorofila, ni en la densidad de organismos fitoplanctónicos totales, ni *A. granulta*.
- C. Se observó un patrón en el cambio de la densidad de *L. robusta* y razón N:P durante el período de tiempo analizado.
- D. Se observó una correlación positiva entre la concentración de ortofosfatos y la clorofila α encontrada durante el período muestreado.
- E. Los resultados para clorofila α fueron más precisos que los de organismos totales medidos con microscopía.
- F. No se observó una correlación entre clorofila α y organismos totales, ni de forma cruda, ni en forma logarítmica.
- G. Es necesario el análisis de interacciones de fitoplancton con otros nutrientes y factores químicos.
- H. Según los índices de estado trófico, existe un exceso de fósforo total, lo que sugiere que el nitrógeno podría ser un nutriente limitante.
- I. Para todas las correlaciones analizadas se rechazó la hipótesis nula.

VI. RECOMENDACIONES

- A. Tomar muestras continuas en todas las profundidades de todas las variables analizadas en éste estudio, para no tener datos faltantes al momento de realizar las correlaciones.
- B. Trabajar con celdas apropiadas para espectrofotometría de diferentes largos, para poder utilizar el tamaño acorde a la concentración de la variable que se esté cuantificando.
- C. Realizar los análisis químicos de las muestras de la misma fecha, el mismo día de trabajo para evitar que fluctuaciones en el equipo puedan afectar los resultados.
- D. Estudiar dinámicas, tanto del fitoplancton en general como de géneros y especies específicos, con otros nutrientes, como por ejemplo micronutrientes y otros factores físicos, como velocidad del viento y temperatura ambiental.
- E. Realizar este análisis con todos los géneros o especies observadas en el Lago Atitlán.
- F. No utilizar recipientes plásticos para llevar a cabo los análisis de fósforo debido a que por su porosidad, retienen contaminantes fosforados, a diferencia del vidrio que es más liso y fácil de limpiar.

VII. LITERATURA CITADA

- Addy, K; Green, L. y Herron, E. 2004. *pH and Alkalinity*. University of Rhode Island. EUA. <http://www.uri.edu/ce/wq/ww/Publications/pH&alkalinity.pdf>
- Alves-De-Souza, C; Menezes, M. y Huszar, V. 2006. *Phytoplankton composition and functional groups in a tropical humic coastal lagoon, Brazil*. *Acta Botânica Brasilica*. 20(3): 701-708.
- AMSA. 2010. *Cuenca del Lago de Amatitlán*. Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán. Guatemala. http://www.amsa.gob.gt/blog/?page_id=5.
- Bernales, A. 2008. *Proyecto: Variabilidad espacio - temporal de la clorofila α , producción primaria y grupos funcionales del fitoplancton frente a la costa peruana (2000-2008)*. Instituto del Mar de Perú e IRD. Perú. es.discoh.ird.fr/content/view/full/45550.
- Bixby, B. 2009. *Introduction to phytoplankton (and other lake algae)*. The University of New Mexico. EUA. <http://bioannexlabs.unm.edu/BIOL/phytoplankton-2009.pdf>.
- Blomqvist, P. y Brunberg, A. 1998. *Chapter 8. LAKES: ORIGIN, ONTOGENY AND NATURAL FUNCTIONS*. Environmental protection and management. Uppsala Universitet. Suecia. Pág. 87-104.
- Bohlen, C. y Narehood, R. 2003. *Nutrients in Lakes*. Bates College. EUA. <http://abacus.bates.edu/~raustin/FluxFlow/L4.2%20nutrients%20in%20lakes.pdf>.

- Bonilla, S; Aubrit, L; Brena, B; Britos, A; Conde, D; Chalar, G; De León, L; Fabre, A; Gabito, L; Hein, V; Kruk, C; Pérez, M; Piccini, C; Rodríguez, G. y Vidal, L. 2009. *Cianobacterias planctónicas del Uruguay. Manual para la identificación y medidas de gestión*. PHI VII-Documento Técnico No. 16. Uruguay. UNESCO, DINAMA, Universidad de la República y Obras Sanitarias del Estado. <http://www.unesco.org.uy/phi/biblioteca/bitstream/123456789/473/1/Cianobacterias+Planctonicas+del+Uruguay.pdf>.
- Braak, C. y Verdonschot, P. 1995. *Canonical correspondence analysis and related multivariate methods in aquatic ecology*. *Aquatic Sciences* 57/3.
- Calvo, M. 2005. *Clorofila*. Universidad de Zaragoza. España. <http://milksci.unizar.es/bioquimica/temas/pigmentos/clorofila.html>.
- Castellanos, E. y Girón, N. 2009. *Calidad Microbiológica del Agua del Lago de Atitlán para los años 2001 y 2006*. Revista 19 de la Universidad del Valle de Guatemala. Guatemala. 36-44 Págs.
- CEA. 2010. “*Métodos de Análisis*”. Laboratorio de Análisis y Monitoreo, Centro de Estudios Atitlán, Universidad del Valle de Guatemala Altiplano. Guatemala. Pag.25-28.
- CENIT. 2008. *Aguas continentales*. Red Escolar Nacional, Gobierno Bolivariano de Venezuela, Ministerio del poder popular, para Ciencia, Tecnología e Innovación, Fundación Centro Nacional de Innovación Tecnológica. Venezuela. <http://www.rena.edu.ve/cuartaEtapa/cienciasTierra/Tema9.html>.

CWT. 2004. *Electrical conductivity/salinity Fact Sheet, FS-3.1.3.0 (EC)*. The Clean Water Team Guidance Compendium for Watershed Monitoring and Assessment, Version 2.0. Division of Water Quality, California State Water Resources Control Board (SWRCB), Sacramento, California. EUA. http://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3130en.pdf.

De León, L. y Chalar, G. 2003. *Abundancia y diversidad del fitoplancton en el Embalse de Salto Grande (Argentina – Uruguay). Ciclo estacional y distribución espacial*. *Limnetica* 22(1-2): 103-113.

Díaz, M.; F. Pedrozo; C. Reynolds; y P. Temporetti. 2007. *Chemical composition and the nitrogen-regulated trophic state of Patagonian lakes*. *Limnologia* 37: 17-27.

Dix, M. Hojas de trabajo correspondientes al curso de Ecología Acuática. Universidad del Valle de Guatemala. 1977-2010.

Dix, M; Dix, M; Cabrera, D; Symonds, Orozco, M; Toledo, A; Bocel, E. 2010. *El Lago Atitlán: Su estado Ecológico: Octubre 2009-Diciembre 2010*. Laboratorio de Análisis y Monitoreo, Centro de Estudios Atitlán, Universidad del Valle de Guatemala. 45 Págs.

Dix, M; Dix, M; Symonds, E; Cabrera, D; Toledo, A. y Orozco, M. 2011. *Informe Anual: Octubre 2009 a diciembre 2010*. Laboratorio de Análisis y Monitoreo, Centro de Estudios Atitlán, Universidad del Valle de Guatemala-Altiplano. Guatemala.

- Dix, M; Dix, M; Orozco, M; Cabrera, D; Boce, E; Toledo, A. y Symonds, E. 2012. *El Lago Atitlán, Guatemala: su estado ecológico octubre 2009-diciembre 2011*. Laboratorio de Análisis y Monitoreo, Centro de Estudios Atitlán, Universidad del Valle de Guatemala-Altiplano. Guatemala. Revista de la Universidad del Valle de Guatemala No. 24. 35-50 pp.
- Domingo, P. y Romero, M. 2012. *La cianobacteria. Caso: Lago de Atitlán*. AMSCLAE. Guatemala.
<http://www.vicepresidencia.gob.gt/v2/sites/default/files/LA%20CIANOBACTERIA.pdf>.
- Edlund, M; Stoermer, E. y Soninkhishig, N. 2010. *Mongolian Diatom Home Page*. University of Michigan-Flint. EUA.
<http://www.umich.edu/~mongolia/checkimage.html>.
- EPA. 2010. *Carlson's Trophic State Index*. US Environmental Protection Agency. EUA.
<http://www.epa.gov/bioiweb1/aquatic/carlson.html>.
- Greenacre, M. 2008. Chapter 5. *Measures of distance between samples: non-Euclidean*. Universitat Pompeu Fabra. España.
<http://www.econ.upf.edu/~michael/stanford/maeb5.pdf>.
- Gregory, M. 2012. *Species Diversity*. Clinton Community College. EUA.
http://faculty.clintoncc.suny.edu/faculty/michael.gregory/files/BIO%20206/206%20Laboratory/Species%20Diversity/Species_Diversity.htm.

- Guadalupe, M; Rodríguez, A; Lugo, A. y Sánchez, M. 2008. *Composición y dinámica del fitoplancton en un lago urbano hipertrófico*. Hidrobiológica, 18 (1 Suplemento): 1-13.
- Gemelgo, M; Mucci, J; Navas-Pereira, D. 2009. Population dynamics: seasonal variation of phytoplankton functional groups in Brazilian reservoirs (Billings and Guarapiranga, São Paulo). *Brazilian Journal of Biology*. 69 (4): 1001-1013.
- HELCOM. 2012. *Annex C-4. Phytoplankton chlorophyll a*. Helsinki Comission Baltic Marine Environment Protection Comission. http://www.helcom.fi/groups/monas/CombineManual/AnnexesC/en_GB/annex4/.
- Istvanovics, V. 2008. The role of biota in shaping the phosphorous cycle in lakes. *Freshwater Rev.* 13-174.
- Kevern, N; King, D. y Ring, R. 2004. *LAKE CLASSIFICATION SYSTEMS – PART 1 y PART 2*. Michigan Lake and Stream Associations. EUA. <http://www.mlswa.org/lkclassif1.htm>.
- Komárek, J. y Hauer, T. 2012. *The on-line database of cyanobacterial genera*. University of South Bohemia and Academy of Sciences of the Czech Republic. República Checa. <http://www.cyanodb.cz/>.
- Lago de Atitlán Expedition 2010. 2010. University of California Davis; University of Nevada, Reno; Universidad Rafael Landivar, Universidad del Valle de Guatemala, University of South Bohemia, Desert Research Institute, Todos por el Lago, Reserva Natural Atitlán. Guatemala. http://lagoatitlan2010.blogspot.com/2010_04_18_archive.html.

- Murti, S. 2006. *Phytoplankton (of fresh waters)*. Soil & Water Conservation Society of Metro Halifax (SWCSMH). Canadá. <http://lakes.chebucto.org/phyto.html>.
- Nabout, J. y Nogueira, I. 2007. *Spatial and temporal dynamics of phytoplankton functional group in a blocked valley (Brazil)*. Acta Limnologica Brasiliensia. 19(3):305-314.
- Obando, R; Villatoro, J; Arana, R; Pineda, M; Aguilar, E; Sarceño, E; Tunay, M; Solares, V; Corzo, F; Belén, Y; Noguera, M; García, E; Reyes, L; Romero, F; Villatoro, P; Alvarenga, C; Rivas E; Pérez, C; Aldana, C. 2008. *Diagnóstico socioeconómico, potencialidades productivas y propuestas de inversión. Municipio de de Panajachel, Departamento de Sololá*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
- OIRSA. 2012. *Descripción de Lagos de Honduras*. Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria. <http://www.oirsa.org/aplicaciones/subidoarchivos/BibliotecaVirtual/LagosHonduras.pdf>.
- Oyadomari, J. 2010. *Freshwater Algae (and Protozoans) of the Keweenaw Peninsula*. Finlandia University y Michigan Technological University. EUA. <http://www.keweenawalgae.mtu.edu/>.
- Prescott, G.W. 1970. *How to know the freshwater Algae*. Dubuque, Iowa: Brown. EUA. 348 p.
- Pulina, S; Padedda, B; Sechi, N. y Luglié, A. 2011. *The dominance of cyanobacteria in Mediterranean hypereutrophic lagoons: a case study of Cabras Lagoon (Sardinia, Italy)*. Scientia Marina 75(1): 111-120.

- Ramachandran, T. y Ahalya, N. 2002. *Limnology Essentials*. Indian Institute of Science. India. <http://ces.iisc.ernet.in/energy/monograph1/Limpage4.html>.
- Ramírez, J. 2010. *Fitoplancton*. Universidad Interamericana Recinto de Ponce. Puerto Rico. <http://cremc.ponce.inter.edu/fitoplancton/>.
- Rejmánková , E; Komárek , J; Dix, M; Komárková, J, y Girón, N. 2011. *Cyanobacterial Blooms in Lake Atitlan, Guatemala*. *Limnologica . Ecology and Management of Inland Waters*. Volume 41, Issue 4. Pag. 296–302.
- Reynolds, C; Verahuszar, V; Kruk, C; Naselli-Flores, L. y Melo, S. 2002. *Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton*. *Journal of Plankton Research*. 24(5):417-428.
- Robertson, D. 2011. *Algal Pigments*. Clark University. EUA. <http://www.clarku.edu/faculty/robertson/Laboratory%20Methods/Pigments.html>.
- Roegner, A; Chandra, S. y Rejmánková, E. 2010. *Cyanotoxin analysis of Lake Atitlan waters from November 2009 to August 2010*. University of California Davis y University of Nevada, Reno. EUA. http://www.cabnr.unr.edu/chandra/CABNR/Atitlan_files/Roegner%20et%20al.%20Cyanotoxin%20final%20report%20to%20Amigos%20.pdf.
- Salazar, M; Naundorf, G. y Medina, M. 2011. *Composición, dinámica y abundancia de la comunidad fitoplanctónica de una laguna con aguas de origen volcánico*. *Luna Azul*, No. 33.

- Salvador, M. 2010. *Anova un factor y Kruskal-Wallis*. Departamento de Tecnología de Alimentos, Facultad de Químicas, Universidad de Castilla La-Mancha. España.
- Skinner, J. 2009. *Light in Lakes*. Keystone College. EUA. http://academic.keystone.edu/jskinner/Limnology/Light_In_Lakes_LectureNotes.htm.
- Slavick, A. 2007. A Beginner's Guide to Water Management in Florida Lakes Fish Communities and Tropic Status. Information Circular 110. University of Florida. EUA. <http://lakewatch.ifas.ufl.edu/circpdf/Circular110.pdf>.
- Smith, G. 1950. *The fresh-water algae of the United States*. New York. EUA. McGraw-Hill Book. 719 Págs.
- Soylu, E. y Gönülol, A. 2010. *Functional Classification and Composition of Phytoplankton in Liman Lake*. Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 10: 53-60.
- Speer, B. 1997. *Photosynthetic Pigments*. Universidad de Berkeley. EUA. <http://www.ucmp.berkeley.edu/glossary/gloss3/pigments.html>.
- Summers, M. 2012. *Chlorophyll (Chl) a analysis*. California State University. EUA. <http://www.csun.edu/~mls42367/Protocols/ChlA%20extraction.pdf>.
- UM. 2009. 6. *Análisis de datos en ecología (II): ANOVA y tablas de contingencia*. Ecología Metodológica y Cuantitativa (5C1), Departamento de Ecología e Hidrología, Universidad de Murcia. España. <http://ocw.um.es/ciencias/ecologia-metodologica-y-cuantitativa/practicas-1/sesion6/sesion06.pdf>.

- Videtich, P. y Crooks, E. 2000. *Lake Stratification*. Grand Valley State University. EUA.
<http://faculty.gvsu.edu/videticp/stratification.htm>
- Wallace, T. y Diamente, D. 2003. *Estudio de ecoturismo en el lado suroeste del Lago de Atitlán*. UVG, Asociación Patronato Vivamos Mejor, CONAPT y TNC. Guatemala.
70 Págs. http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/Pnadd426.pdf
- Weiss, C. 1970. *Lake Atitlan*. University of North Carolina. Guatemala. 173 Págs.
- Wetzel, R. 2001. *Limnology. Lake and River Ecosystems*. 3era. Edición. Academic Press.
EUA. 1006 Págs.

VIII. ANEXOS

A. Fotografías del equipo utilizado

Figura 16 Espectrofotómetro Agilent 8453



En la figura se muestra el espectrofotómetro utilizado en los análisis químicos de determinación de concentración de fósforo total y clorofila en las muestras analizadas.

Figura 17 Celda adaptada para espectrofotometría de 5cm



En la parte superior de la figura se observa la vista dorsal de la celda de 5cm adaptada para espectrofotometría utilizada para los análisis de concentración de fósforo total, mientras que en la parte inferior se observa la vista frontal, por donde penetraba el haz de luz a la muestra contenida en la celda.

B. Complemento para los protocolos de análisis químicos

Toda la cristalería que iba a estar en contacto con las muestras a cuantificar de clorofila o fósforo total se lavó previo a su análisis con HCl 0.1M.

Este procedimiento se realizó lavando la cristalería tres veces con agua ultrapura (suministrada por el laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala), posteriormente se dejó reposar *overnight* en un baño de ácido (HCl 0.1M) y antes de usarla se autoclaveó a 75% de su capacidad volumétrica con HCl 0.1M por 15 minutos a 250°F, y posteriormente se desaguó nuevamente tres veces con agua ultrapura. El HCl se reutilizó por no más de un mes, siempre y cuando no tuviera sólidos en suspensión visibles, ni malos olores (comunicación personal de M.Sc. Emily Carlson de la Universidad de California Davis y del Lic. Ángel Ramírez de la Universidad el Valle de Guatemala).