



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



DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIÓN Y CALIDAD AMBIENTAL -DICA- INFORME “MONITOREO LIMNOLÓGICO 2015”

Fátima Reyes, Flor Barreno, Isabel Arriola,
Cristina Martínez, Natanael Xamínez y Domingo Ujpan

1. INTRODUCCION

El lago Atitlán representa uno de los recursos naturales más valiosos y populares del país, debido a su paisaje, cultura, uso recreacional, consumo humano, es un atractivo turístico y fuente de beneficios a la población. Según el artículo 13 del Reglamento de la AMSCLAE (Acuerdo Gubernativo 78-2012) el Departamento de Investigación y Calidad Ambiental, es un órgano técnico operativo de la Subdirección Técnica, responsable de la investigación científica institucional, del monitoreo permanente del lago, los recursos hídricos de la cuenca y el clima, así como de la calidad ambiental en la cuenca mediante la evaluación permanente del impacto ambiental de las diversas acciones que en ésta se desarrollan y de fomentar la gestión integrada de riesgos. De esta manera la AMSCLAE, a través del Departamento de Investigación y Calidad Ambiental, efectúa el monitoreo permanente del lago y sus cuencas tributarias con equipos de campo y de laboratorio propios con el objetivo de generar y brindar información técnica y científica necesaria para guiar los procesos de gestión del lago y su cuenca.

En los últimos años el monitoreo del lago de Atitlán y sus cuencas tributarias ha cobrado importancia, debido a que se ha hecho evidente el proceso de degradación del lago, dando como resultado el florecimiento de cianobacterias (*e.g.* noviembre y diciembre del año 2008, octubre a diciembre de 2009, septiembre 2014 y agosto 2015) (AMSCLAE 2011). Desde el 2013 se realiza un monitoreo sistemático de las condiciones físicas, químicas y biológicas del lago de Atitlán. En el monitoreo se realizan varias mediciones fisicoquímicas y biológicas en ocho sitios de muestreo, con el fin de alcanzar una mejor comprensión del comportamiento del lago a lo largo de la columna de agua y a través del tiempo. Con los resultados se ha evidenciado que el ingreso de nutrientes al cuerpo de agua, provenientes de distintas fuentes, ha deteriorado la calidad del agua (Sudeep *et al.*, 2014; DICA, 2015). Esto se ha visto reflejado en la reducción de las concentraciones de oxígeno en el fondo del lago, florecimientos algales más frecuentes, reducción de la transparencia y presencia de coliformes y *E. coli* en todo el lago, sobre todo en zonas cercanas a centros urbanos.

Para analizar e interpretar los datos registrados durante los muestreos limnológicos, es necesario complementar la información con datos generados en otros programas de monitoreo que realiza el departamento, tales como el monitoreo de ríos, vegetación acuática, climático y fitoplancton. Debido a que los ecosistemas acuáticos son muy dinámicos y complejos se hace necesario continuar con los programas de monitoreo para poder en un futuro generar modelos que puedan de cierta forma explicar el comportamiento del lago y algunas tendencias como respuesta al impacto constante al que está sujeto y sobre todo al cambio climático.

2. OBJETIVOS

General

Generar información técnica y científica necesaria para guiar los procesos de gestión del lago y su cuenca

Específicos

Evaluar en forma sistemática la calidad del agua del lago de Atitlán, a través de un programa de monitoreo de algunos parámetros físicos, químicos y biológicos.

Ampliar la base de datos de calidad de agua con datos confiables que permitan analizar en el tiempo el estado del lago y sus tendencias.

Comparar el estado actual del Lago de Atitlán con estudios realizados en años anteriores.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El monitoreo de la calidad del agua del Lago de Atitlán se realizó mensualmente en algunas de las estaciones definidas por el profesor Charles Weiss (1968) (Cuadro 1, Fig. 1). El monitoreo se realizó muestreando de forma superficial y a diferentes profundidades, a manera de realizar perfiles verticales

Cuadro 1 Nombre de la estación de monitoreo y su ubicación sobre el espejo de agua.

Estación	Ubicación	Coordenadas		Profundidad máxima (m)
		N	W	
WA	Frente a San Pedro y San Juan la Laguna	14°42.129	91°15.009	230
WB	Frente a San Pablo y San Marcos la Laguna	14°43.201	91°12.828	316
WC	Frente a San Antonio y Sta. Catarina Palopó	14°41.288	91°7.950	309.4
WD	Bahía de San Lucas Tolimán	14°38.801	91°8.2330	130
WE	Entrada a Bahía de Santiago Atitlán	14°38.923	91°13.903	58.2
WG	Centro del Lago	14°41.943	91°11.076	311.1
WP	Bahía de San Buenaventura	14°44.529	91°10.038	112
W14	Centro de Bahía Atitlán	14°37.608	91°14.563	36.8

Fuente: DICA/AMSCLAE, 2015

Muestreo fisicoquímico

Las mediciones de los parámetros físicos *in situ* (Oxígeno Disuelto, Saturación de oxígeno, Temperatura, Conductividad, TDS, Salinidad, pH y Clorofila *a*) de los primeros 200m, se realizaron con una sonda multiparametrica Hydrolab. Adicionalmente en cada estación se midió transparencia con el disco Secchi, color en escala Forel Ule y se recolectaron muestras de agua con la botella tipo Van Dorn a distintas profundidades (0, 10, 30, 40 y 60m) para realizar algunos análisis físicos, químicos y microbiológicos en el laboratorio (Turbidez, Color Aparente, Color Verdadero, Fósforo Total (PT), Nitrógeno Total (NT), Fosfatos (PO₄), Nitratos (NO₃)). Así mismo en la superficie se midió Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno, E. Coli y Coliformes Totales.

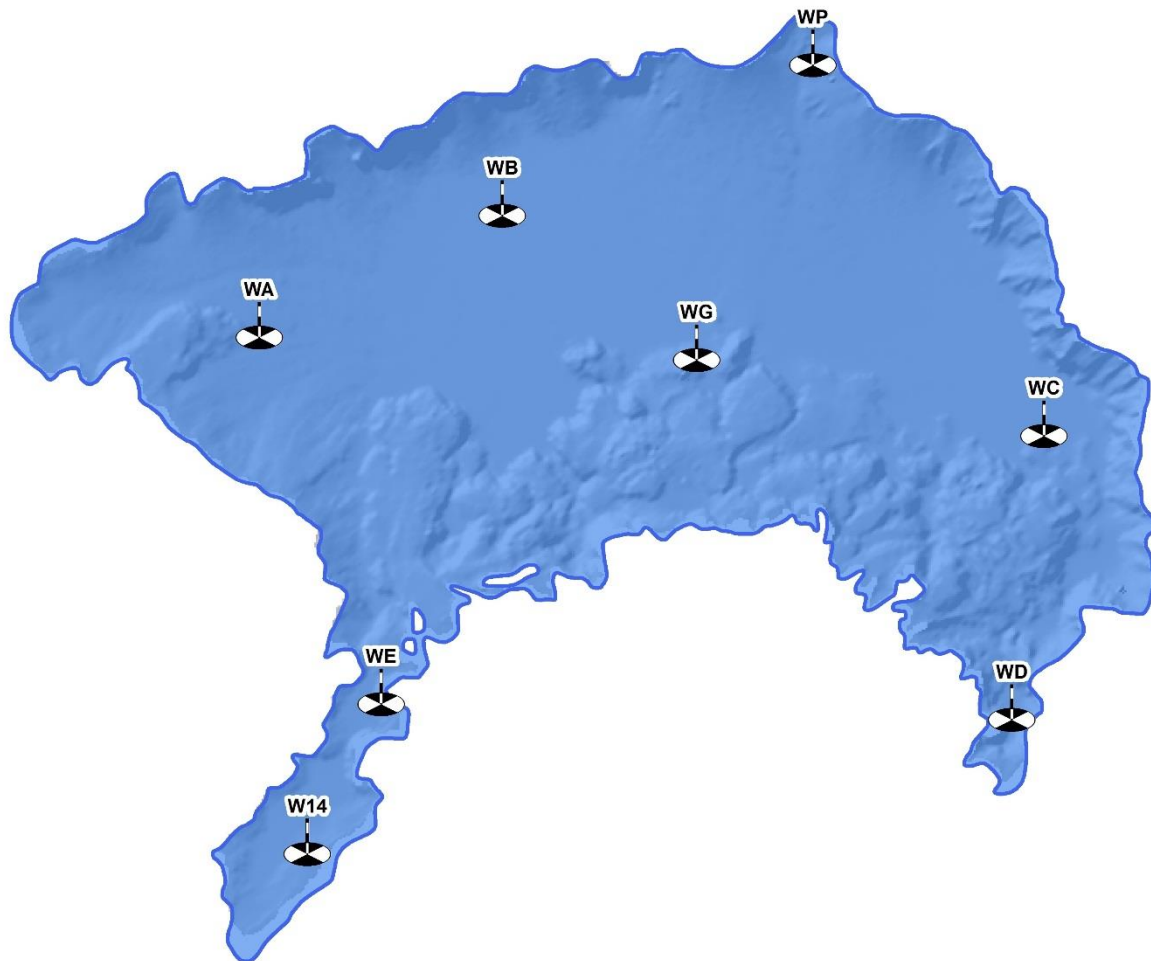


Figura 1. Mapa de Ubicación de los sitios de muestreo. (DICA/AMSCLAE, 2015).

Muestreo y análisis de laboratorio

Antes de recolectar las muestras de agua los envases fueron lavados dos o tres veces con la muestra. Según el tipo de análisis, el envase se llenó por completo (análisis orgánicos) o se dejó un espacio vacío para que la muestra se airee (análisis microbiológicos). Las muestras fueron transportadas en hieleras a 4°C aproximadamente (APHA-AWWA-WPCF, 1992; WHO, 200).

Los análisis de nutrientes se realizaron a 24°C, 48 hrs después de tomada la muestra. La turbidez, color aparente y color verdadero fueron analizados al tercer día posterior a la toma de muestras. Las muestras colectadas para los análisis microbiológicos fueron procesadas inmediatamente al ingresar al laboratorio ya que no pueden ser almacenadas para su posterior análisis por más de 24 hrs.

Muestreo de Fitoplancton

Las muestras de fitoplancton fueron integradas, es decir que se recolectaron desde la superficie hasta los 30m de profundidad. En cada sitio se tomaron dos muestras de agua (~3.2 litros) con una manguera de 30m de largo. Posteriormente la muestra de agua se filtró con una red de fitoplancton de 20 micras de luz de malla. Las muestras fueron fijadas con una solución de lugol y trasladadas al laboratorio de AMSCLAE. En el laboratorio, se analizaron las muestras con ayuda de un microscopio, portaobjetos y cubreobjetos. Los conteos se realizaron hasta los 300 organismos por litro y luego se realizaron los respectivos cálculos de abundancia relativa y número de células por litro. La identificación de las algas se realizó hasta el máximo nivel taxonómico posible, en su mayoría a género, con ayuda de claves taxonómicas. Las muestras ya analizadas y procesadas fueron almacenadas en el laboratorio de la AMSCLAE como referencia.

RESULTADOS Y DISCUSION

Transparencia

La transparencia del Lago de Atitlán durante el año 2015 osciló entre los 3.7 y 12m de profundidad (Anexo 1). Los sitios W14 y WE, ubicados en la bahía de Santiago Atitlán, fueron los que registraron los valores más bajos de transparencia (Fig. 2), esto se podría deber a la alta productividad de algas en la bahía.

Durante abril (9.1m) y julio (8.8m) se registraron los valores más altos del disco Secchi, es decir mayor transparencia (Anexo 1 y Fig. 3). El resto de los meses los valores de Secchi fueron bajos, esto podría a deberse a la alta densidad de algas en la columna de agua (ver concentraciones de clorofila, Fig. 12) y al ingreso de sedimentos por escorrentía. En la temporada lluviosa hay un mayor ingreso de sólidos en suspensión, debido a las altas cargas de sedimentos que traen los ríos tributarios que desembocan en el lago (Roldán y Ramírez, 2008; Reynolds, 2004a), estos sedimentos suspendidos en la columna de agua reducen la cantidad de luz que penetra a la columna de agua y por consiguiente la transparencia.

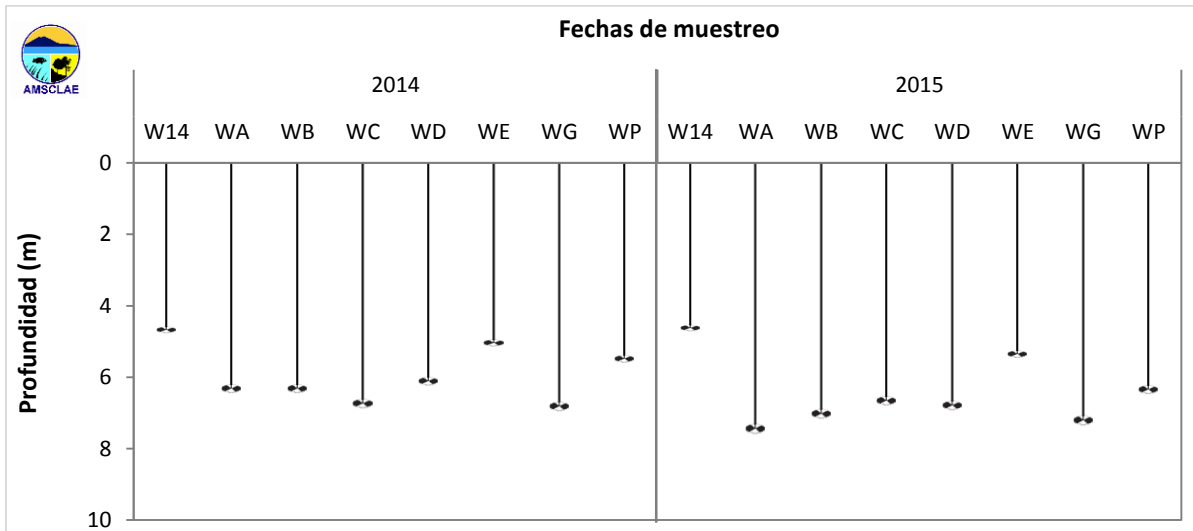


Figura 2 Valores promedio de transparencia por sitio durante el 2014 y 2015. (DICA/AMSCLAE, 2015).

En la figura 3 se observa como ha disminuido la transparencia del agua a través del tiempo, según los datos del estudio realizado por Weiss en los años 1968 y 1969, en relación a los datos obtenidos en el año 2013, 2014 y 2015 por DICA. La transparencia en el centro del lago (WG) en febrero del 1969 fue de 19m y durante el 2015, la transparencia en el centro del lago fue de 4 m a 12m, estos valores están muy por debajo de los reportados en los años 68' y 69' (Weis, 1971). La reducción de la transparencia del lago en los últimos años podría deberse al alto ingreso de sedimentos producto de las actividades antropogénicas y al aumento de la densidad y la productividad de las algas sobre la columna de agua (Löffler, 2004; Lampert & Sommer, 2007; Roldán y Ramírez, 2008).

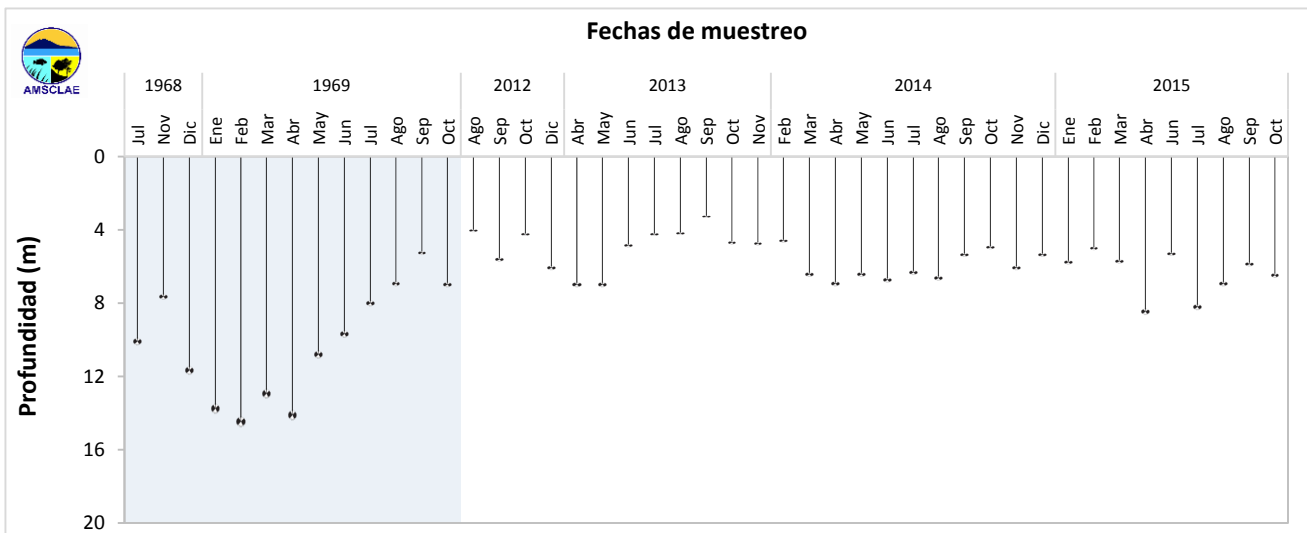


Figura 3. Registro histórico de transparencia del agua. (DICA/AMSCLAE, 2015).

Temperatura

La temperatura en el lago nos permite comprender la estratificación térmica de la columna de agua, la cual se refiere al fenómeno cuando las aguas de la superficie se calientan y forman una capa que flota encima de las aguas más profundas y frías. Cuando la temperatura se iguala en ambas zonas desaparece con ella la estratificación, este fenómeno puede ser ocasionado por los vientos que enfrían la capa superficial (Roldán, 2008). En la figura 4 se observa la variación espacial (profundidad) y temporal (meses) de los valores de la temperatura durante el 2013, 2014 y 2015. Durante los meses de frío (nov – feb) se observa una reducción (color azul y verde) de la temperatura superficial (Fig. 4), en comparación a los meses calurosos. La temperatura del epilimnion (capa superficial) (0 - 50m) en todos los sitios de muestreo oscila entre los 20 y 24°C. Entre los 35 y 40m de profundidad se observa la termoclina y por debajo de esa profundidad el hipolimnion (capa profunda) (Fig. 4 y 5).

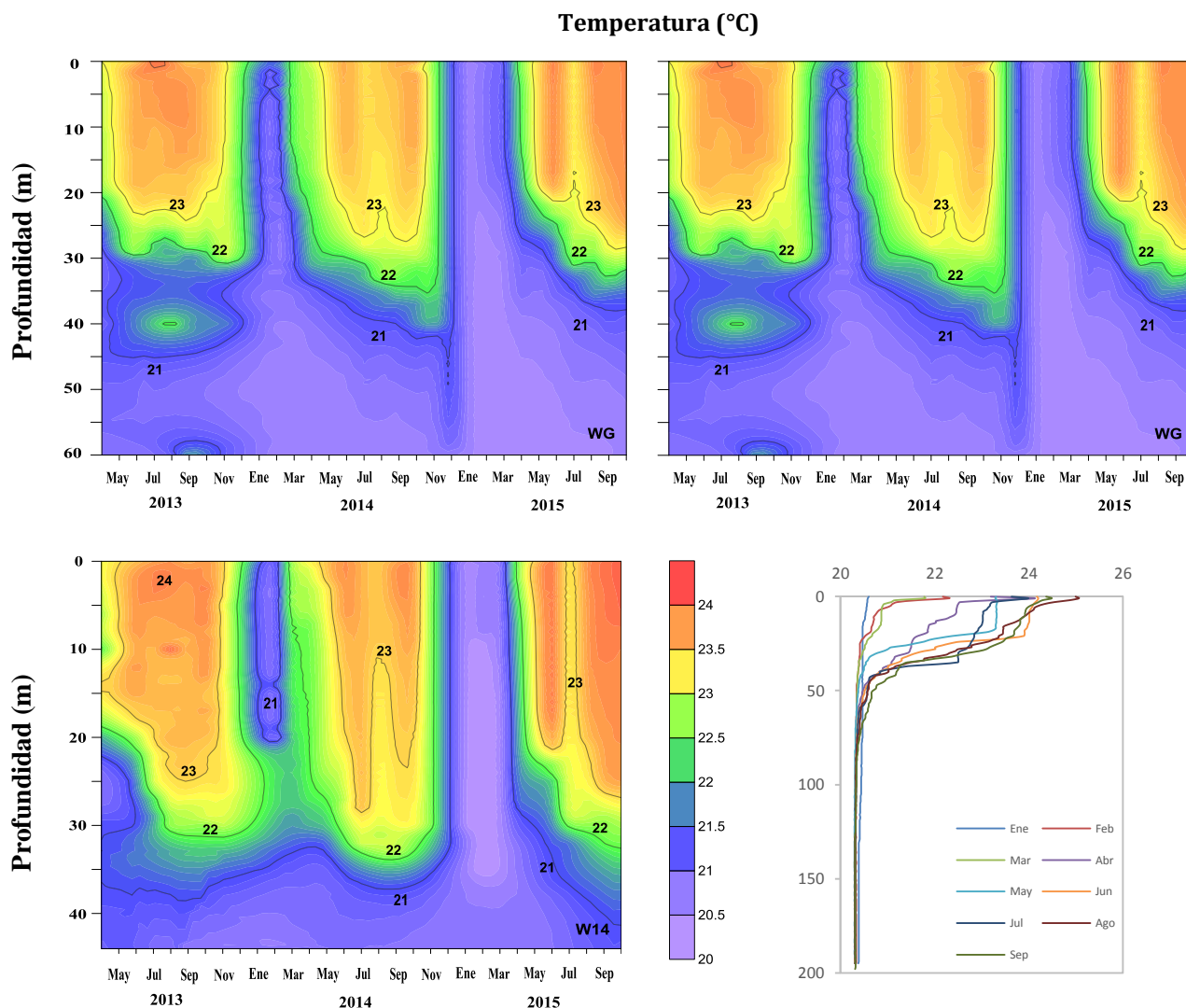


Figura 4. Variación espacial y temporal de la Temperatura (°C) del lago Atitlán durante el 2013, 2014 y 2015 (DICA/AMSCLAE, 2015). WG (centro del Lago), WP (Panajachel) y W14 (Bahía de Santiago).

La baja variación de la temperatura en aguas superficiales y profundas ($\pm 2^{\circ}\text{C}$) podría indicar que el calor logra distribuirse hacia las capas profundas del lago. Es probable que la acción del viento y otras fuerzas generadoras de turbulencia distribuyan el calor de la superficie a las capas profundas durante el día y la noche (Löffler, 2004; Reynolds, 2004b; Lampert & Sommer, 2007; Roldán y Ramírez, 2008).

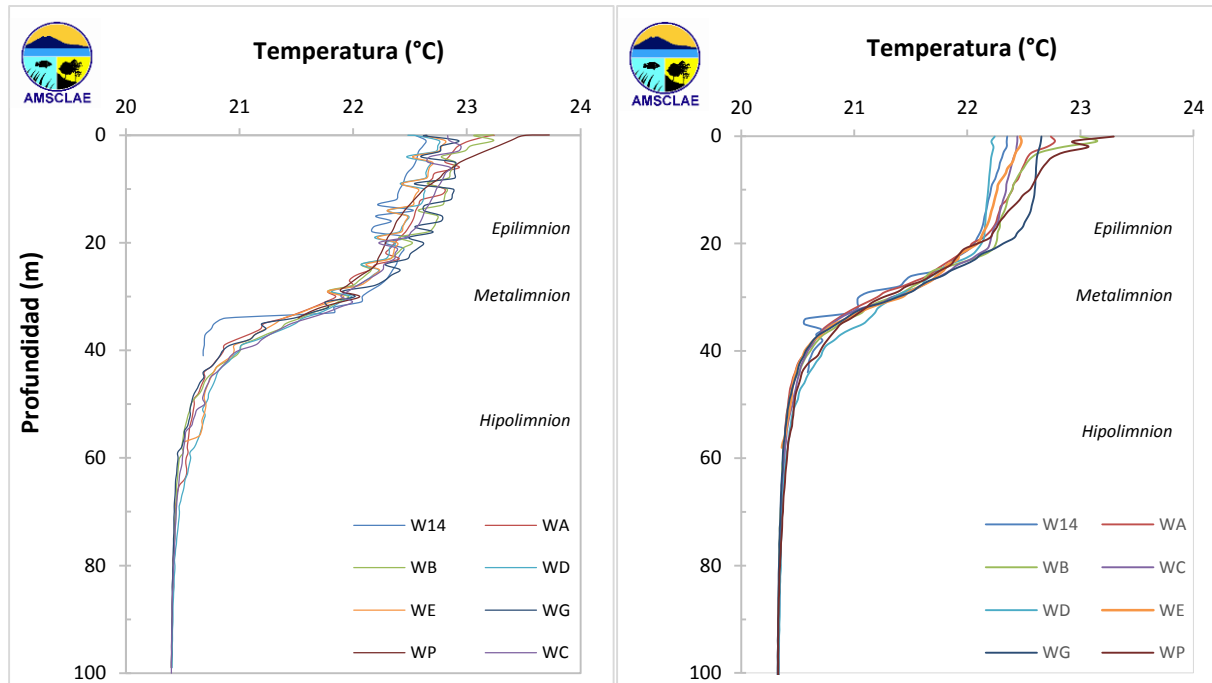
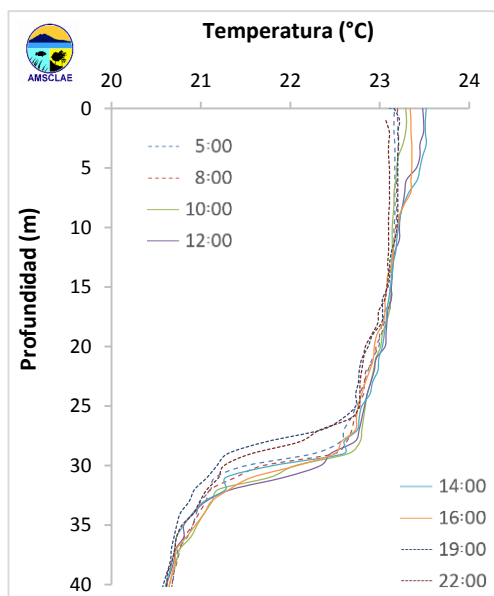


Figura 5. Perfiles de valores promedio de temperatura durante el 2014 (Izq.) y 2015 (Der.) (DICA/AMSCLAE, 2015).



Durante el mes de julio se realizó un muestreo de 24 hrs y se pudo observar que durante las horas de la tarde (12:00, 14:00 y 16:00 hrs) la temperatura de la superficie fue ligeramente mayor (0.5°C aproximadamente) a la temperatura de la noche y la madrugada. En la figura 6 también se observa que la estratificación de la columna de agua se mantiene a lo largo del día. No obstante, deben ampliarse los registros para observar si el comportamiento se mantiene durante la época seca y la lluviosa.

Figura 6. Perfiles de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) durante un período de 24 hrs (DICA/AMSCLAE, 2015).

Oxígeno Disuelto (O_2)

Después de la temperatura, el oxígeno es uno de los factores más importantes que debe ser medido en el agua. En la figura 7 se observa la variación espacial (profundidad) y temporal (meses) de los valores del oxígeno disuelto desde el 2013 al 2015. La concentración del oxígeno en la capa superficial (0 - 30m) osciló entre los 6 y 8.5 mg/L. En todos los sitios de muestreo se registraron descensos de las concentraciones de oxígeno después de los 40m de profundidad (Fig. 7 y 8), esto se debe a que las capas profundas no están en contacto directo con la atmósfera, por lo tanto no hay un intercambio directo de oxígeno (Lampert & Sommer, 2007; Roldán y Ramírez, 2008).

Oxígeno Disuelto (mg/L)

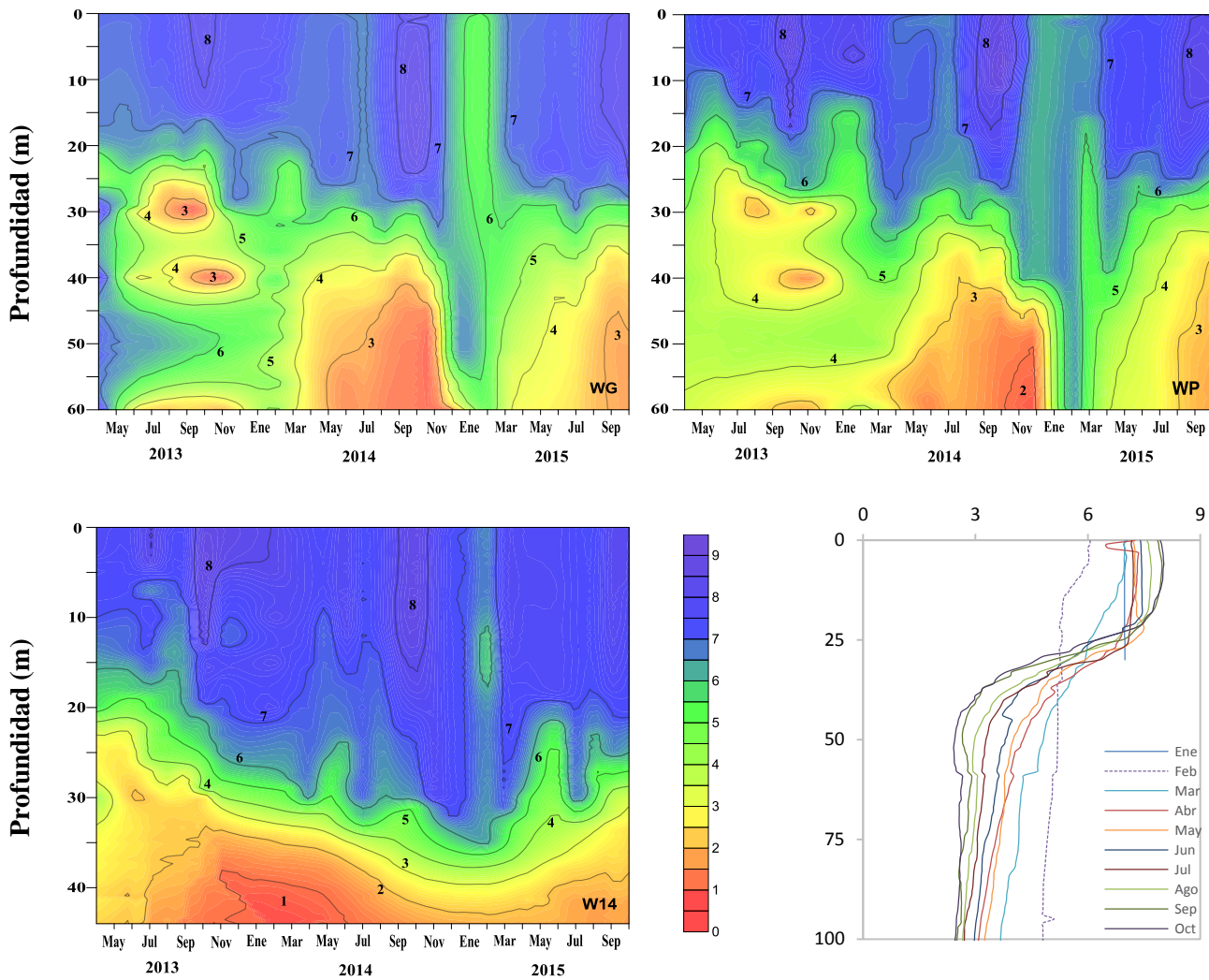


Figura 7. Variación espacial y temporal del Oxígeno disuelto (mg/L) del lago Atitlán durante el 2013, 2014 y 2015 (DICA/AMSCLAE, 2015). WG (centro del Lago), WP (Panajachel) y W14 (Bahía de Santiago).

En el mes de febrero las concentraciones de oxígeno disminuyeron en la capa superficial de la columna de agua, esto pudo deberse a que haya habido una mezcla de la capa superficial con la capa profunda, la cual tiene menor concentración de oxígeno.

Al igual que la temperatura existe una estratificación del oxígeno disuelto en los primeros 40m de profundidad (Fig. 8). Por arriba de los 40m la concentración de oxígeno oscilo entre los 8 y 7 mg/L, luego de los 40m la concentración estuvo entre los 4 y 3mg/L, cuatro unidades menos que en la zona superficial.

En los perfiles del oxígeno disuelto (Fig. 8) se observa que las concentraciones de oxígeno disuelto durante el 2015 fueron mayores en las capas profundas en comparación al 2014. Los valores se mantuvieron alrededor de los 3 mg/L, mientras que en el 2014 los valores fueron cercanos a 0 mg/L.

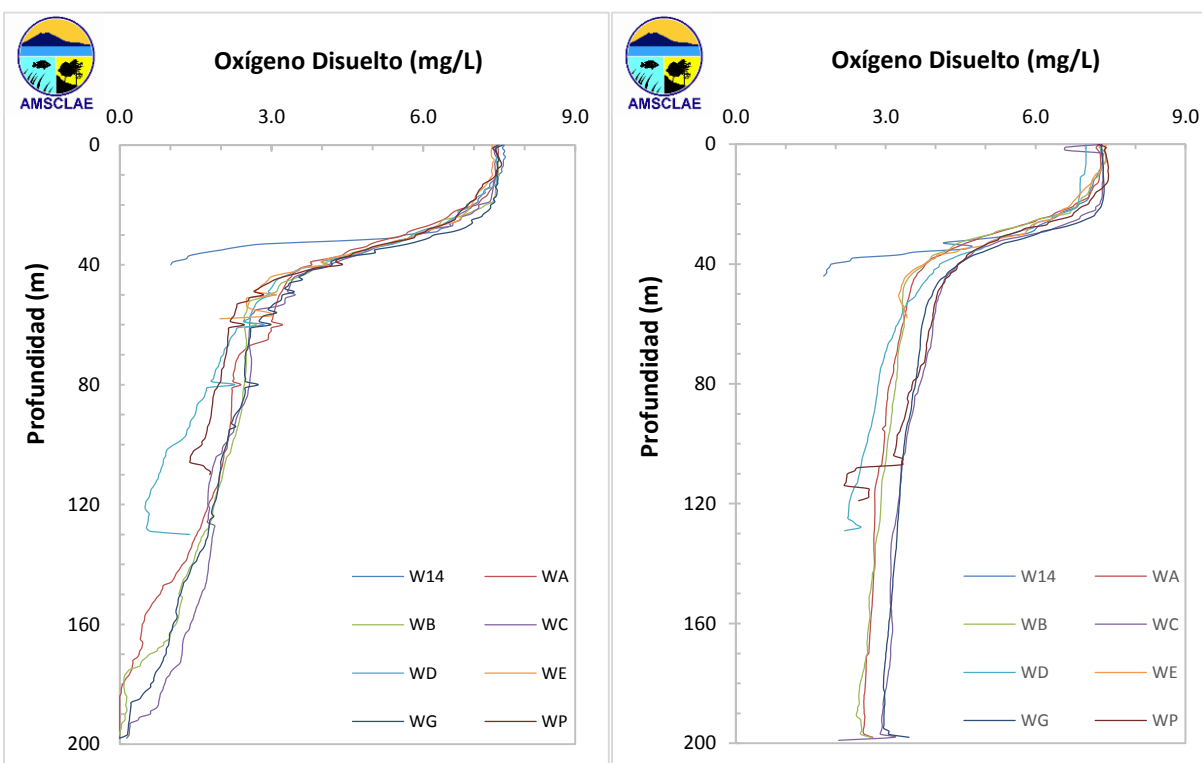


Figura 8. Perfiles de valores promedio de Oxígeno disuelto durante el 2014 (Izq.) y 2015 (Der.) (DICA/AMSCLAE, 2015).

Cabe mencionar también que en las capas profundas hay un mayor consumo del oxígeno disuelto por bacterias, debido a la degradación de la materia orgánica que ingresa al lago por la acción del viento o por las descargas de aguas residuales y los afluentes. Adicionalmente, la capa superficial puede presentar concentraciones mayores de oxígeno debido a la acción del viento y otras fuerzas generadoras de turbulencia (Lampert & Sommer, 2007).

Potencial de Hidrógeno (Ph)

El potencial de hidrógeno, pH, es el término que nos indica la concentración de iones hidrógeno en una disolución. Se trata de una medida de la acidez de la disolución. El agua pura tiene un pH de 7, aguas con valores por arriba de siete son aguas básicas y por debajo son aguas ácidas.

En el cuadro 2 se puede observar los valores máximos y mínimos de pH por cada sitio durante el 2014 y 2015. Los valores de pH durante el 2015 oscilaron entre 7.5 y 9 por mes y sitio de muestreo. Las diferencias de pH entre la capa superficial y la profunda podría deberse a la actividad biológica (fotosíntesis y respiración) en la columna de agua. El pH del agua disminuye cuando el dióxido de carbono (CO₂) atmosférico se une con la capa superficial de agua (H₂O) forma una molécula ácida (ácido carbónico, H₂CO₃). No obstante, los organismos fotosintéticos (e.g. algas) durante el proceso de fotosíntesis, absorben el CO₂ disuelto, disminuyendo así las concentraciones de CO₂ en el lago y provocando un aumento del pH. El pH del agua de lago tiende a ser mayor en el verano y en las aguas superficiales, ya que más algas y plantas acuáticas están presentes en la zona superficial (Horne & Goldman, 1994; Pokorný & Květ, 2004; Lampert & Sommer, 2007; Roldán y Ramírez, 2008).

Conductividad eléctrica (K)

La conductividad (*K*) de una solución es una medida de su capacidad para conducir la electricidad, en muchos casos, está directamente vinculada a la cantidad de sólidos totales disueltos (TDS). La *K* en lagos de zonas tropicales está relacionada principalmente con el tipo del lago (oligo o eutrófico), la profundidad, la naturaleza geoquímica del terreno y las variaciones climáticas (época de lluvia y sequías) (Roldán y Ramírez, 2008). En el cuadro 3 se pueden observar los valores máximos y mínimos de *K* de todos los sitios de muestreo durante el 2014 y 2015.

En los meses de Oct/2014 y Ene–Feb/2015 se registraron los valores más altos de conductividad (Fig. 9). El aumento de la cantidad de elementos o iones presentes en la columna de agua durante estos meses podría deberse al arrastre de partículas por acción del viento o por la escorrentía. La variación de la *K* proporciona información sobre la productividad primaria, descomposición de la materia orgánica, la detección de fuentes de contaminación y la naturaleza geoquímica del terreno. Los puntos ubicados cerca de las desembocaduras de los ríos (WP) pueden presentar valores más altos debido a las descargas de las aguas que provienen del Río San Francisco y Quiscab.

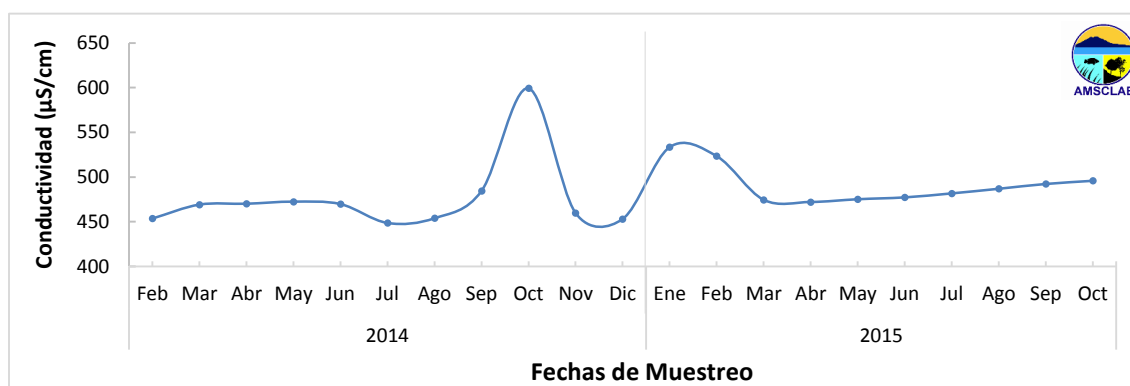





Figura 9. Valores promedio de Conductividad (µS/cm) durante el 2014 y 2015 (DICA/AMSCLAE, 2015).


Cuadro 2. Valores máximos y mínimos de pH durante el 2014 y 2015. (DICA/AMSCLAE, 2015).

 2014		Sitios de Muestreo							
		W14	WA	WB	WC	WD	WE	WG	WP
Feb	Mín	8.84	8.68	8.72	9.12	8.98	8.30	8.38	
	Máx	9.18	9.48	9.50	9.49	9.49	9.40	9.50	
Mar	Mín	7.88	8.08	8.29	8.04	8.00	7.75	8.27	8.17
	Máx	8.47	8.57	8.78	8.55	8.57	8.56	8.70	8.57
Abr	Mín	8.14	8.14	8.20	8.22	8.11	7.90	7.94	8.19
	Máx	8.63	8.74	8.70	8.70	8.69	8.74	9.11	8.69
May	Mín	7.85	8.40	8.48			8.17		
	Máx	8.77	9.37	9.50			9.01		
Jun	Mín	8.09	8.15	8.01	8.71	8.37	7.76	7.99	7.66
	Máx	8.81	9.07	9.35	9.49	9.43	9.15	9.48	8.90
Jul	Mín	8.00	8.41	8.68	7.59	7.67	8.12	7.57	7.80
	Máx	9.02	9.43	9.49	9.39	9.05	9.46	9.07	9.18
Ago	Mín	7.71	8.21	8.39	8.42		7.86	8.16	8.62
	Máx	8.27	9.48	9.46	9.50		9.02	9.49	9.45
Sep	Mín	7.45	6.78	7.23	7.28	6.64	6.93	7.03	6.61
	Máx	8.35	9.12	8.79	8.86	9.13	9.41	9.33	8.89
Oct	Mín	8.42	8.24	8.31	7.41	7.59		6.89	8.36
	Máx	9.24	9.50	9.49	9.24	9.07		9.45	9.48
Nov	Mín	7.16	6.70				8.09	9.44	
	Máx	9.40	9.50				9.49	9.44	
Dic	Mín	8.38	7.67	7.71	7.63	7.45	8.41	7.78	7.79
	Máx	8.51	8.64	8.62	8.70	8.63	8.58	8.69	8.57

 2015		Sitios de Muestreo							
		W14	WA	WB	WC	WD	WE	WG	WP
Ene	Mín	8.59	8.51	8.49	8.76	8.63	8.56	8.48	8.47
	Máx	8.40	7.82	7.78	7.72	8.17	8.4	7.73	8.37
Feb	Mín	8.29	8.49	8.48	8.54	8.33	8.38	8.51	8.75
	Máx	8.06	7.9	7.89	7.85	8.07	8.05	7.94	8.08
Mar	Mín	8.56	8.73	8.74	8.8	8.73	8.71	8.79	8.73
	Máx	8.41	8.14	8.23	8.27	8.29	8.34	8.19	8.28
Abr	Mín	8.68	8.87	8.81	8.72	8.72	8.72	8.77	8.8
	Máx	7.96	8.15	8.17	8.11	8.1	7.99	8.12	8.23
May	Mín							8.79	
	Máx							8.07	
Jun	Mín	8.72	8.82	8.89	8.97	9.02	8.77	8.99	9.02
	Máx	7.7	8.07	8.01	8.14	7.81	7.9	8.17	8.19
Jul	Mín	8.97	8.85	8.72	8.8	8.74	8.67	8.86	8.73
	Máx	8.02	8	7.97	7.59	7.88	7.9	7.74	7.76
Ago	Mín	8.9	8.97	8.92	8.97	8.93	8.89	9.01	8.88
	Máx	8.23	8.06	8.03	7.89	8.03	8.01	7.61	8.1
Sep	Mín	8.99	9.11	8.97	9	8.97	9.13	8.99	9.16
	Máx	7.97	7.72	7.85	7.96	7.93	7.76	7.87	7.81
Oct	Mín	8.5	8.04	7.85	7.92	7.86	7.9	7.64	7.86
	Máx	8.67	9.03	8.55	8.72	8.63	9.00	8.22	8.87

Cuadro 3. Valores máximos y mínimos de conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) durante el 2014 y 2015 (DICA/AMSCLAE, 2015).

	2014	Sitios de Muestreo							
		W14	WA	WB	WC	WD	WE	WG	WP
Feb	Mín	444	441	441	441	442	441	441	-
	Máx	446	444	445	444	444	452	607	-
Mar	Mín	470	467	464	467	465	468	468	466
	Máx	474	478	469	471	470	478	480	470
Abr	Mín	474	471	469	468	470	473	469	469
	Máx	479	474	473	473	473	483	473	473
May	Mín	471	470	466	-	-	473	-	-
	Máx	483	474	474	-	-	478	-	-
Jun	Mín	462	463	461	464	464	459	459	458
	Máx	474	473	475	474	473	480	474	473
Jul	Mín	439	438	440	439	439	440	439	439
	Máx	453	448	448	448	447	455	447	447
Ago	Mín	436	435	436	436	-	437	435	531
	Máx	448	444	444	444	-	451	444	618
Sep	Mín	660	433	431	433	432	433	431	431
	Máx	680	847	442	442	452	448	446	441
Oct	Mín	440	442	742	673	625	-	440	768
	Máx	458	455	936	785	693	-	454	815
Nov	Mín	444	442	443	444	444	447	443	517
	Máx	446	456	455	546	455	462	455	534
Dic	Mín	447	448	448	448	448	450	448	445
	Máx	451	456	455	457	456	453	455	455

	2015	Sitios de Muestreo							
		W14	WA	WB	WC	WD	WE	WG	WP
Ene	Mín	460	463	464	617	463	463	462	795
	Máx	466	469	469	753	468	468	469	802
Feb	Mín	469	470	469	542	716	470	468	520
	Máx	474	473	473	568	785	478	474	576
Mar	Mín	473	471	469	471	471	474	469	472
	Máx	478	476	476	475	475	480	475	475
Abr	Mín	474	471	469	470	471	471	471	469
	Máx	485	475	475	478	473	479	473	476
May	Mín	-	-	-	-	-	-	474	-
	Máx	-	-	-	-	-	-	476	-
Jun	Mín	476	474	472	475	473	478	473	470
	Máx	489	480	480	479	478	486	480	478
Jul	Mín	482	478	480	478	478	482	478	478
	Máx	494	488	484	482	484	490	483	483
Ago	Mín	489	484	486	483	484	488	484	485
	Máx	495	489	489	488	488	495	489	489
Sep	Mín	490	489	488	487	488	488	487	487
	Máx	510	495	495	494	494	509	494	496
Oct	Mín	491	486	486	485	486	484	485	481
	Máx	495	500	499	499	499	511	500	499

Fosfatos (PO_4^{3-})

El fósforo se encuentra en el agua dos formas principales, ortofosfatos y polifosfatos, los cuales puede ser absorbido por las plantas acuáticas y el fitoplancton. Los fosfatos son muy reactivos e interactúan con muchos cationes para formar compuestos insolubles que precipitan (*e.g.* hierro). En la figura 10 se observa el comportamiento de los fosfatos durante el 2014 y 2015, en ambos años se observa que durante los meses de febrero y marzo las concentraciones fueron mayores en relación a los otros meses. Esto podría deberse a que en esas fechas la temperatura del agua disminuye y hay mucha turbulencia en la superficie del lago, reduciendo así la productividad primaria de las algas y por lo tanto la absorción de fosfatos es menor (Ochaeta, 2014).

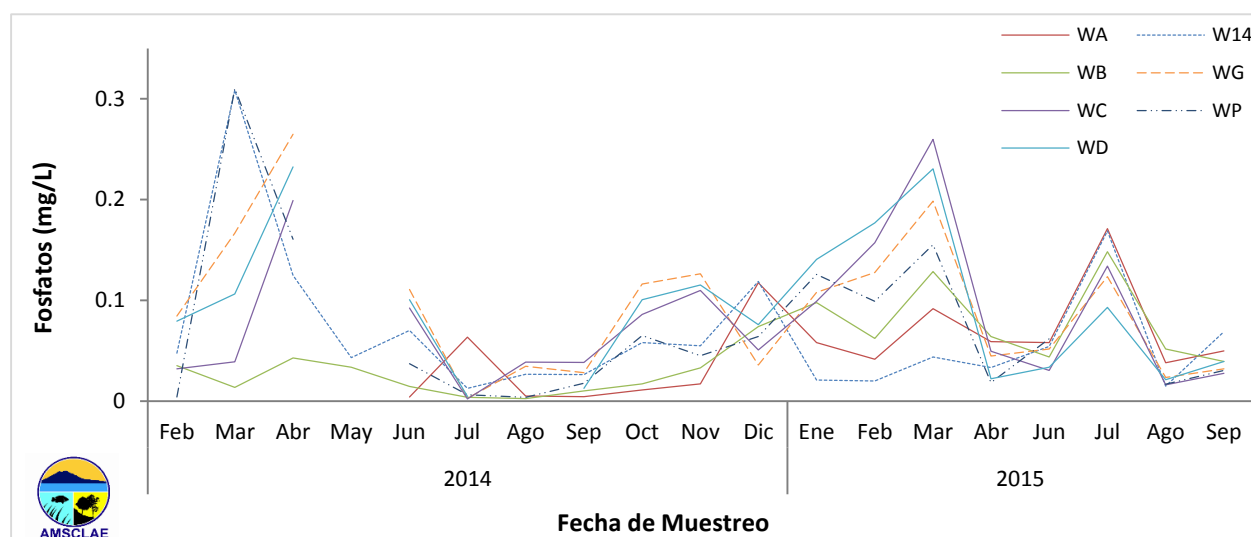


Figura 10. Valores promedio de fosfatos en el lago Atitlán durante el 2014 (DICA/AMSCLAE, 2015).

Las concentraciones de fosfatos en el 2014 y 2015 en los primeros 30m oscilaron entre los 0.02 - 0.09 y 0.04 - 0.09mg/L, respectivamente (Fig. 11). La baja concentración de fosfatos en la capa superficial podría deberse a que en esta zona hay una mayor absorción de fosforo, debido a la productividad primaria de las algas (Fig. 11). Los ortofosfatos son menos móviles que otros nutrientes y precipitan más rápido cuando se combina con otros cationes (Ca^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+}), formando productos altamente insolubles (Lampller & Sommer, 2007).

En el 2015 se observa que las concentraciones de fosfatos fueron relativamente menores en comparación a las del 2014 (Fig. 11), esto podría deberse al número de muestras tomadas. En el 2014 se recolectaron muestras a cada 10m para hacer análisis de fosfatos, mientras que en el 2015 en las profundidades de 0, 10, 30, 40 y 60. No se tienen datos de buena calidad de años anteriores, por lo tanto no se pudo realizar un análisis comparativo del cambio del fosforo en el tiempo.

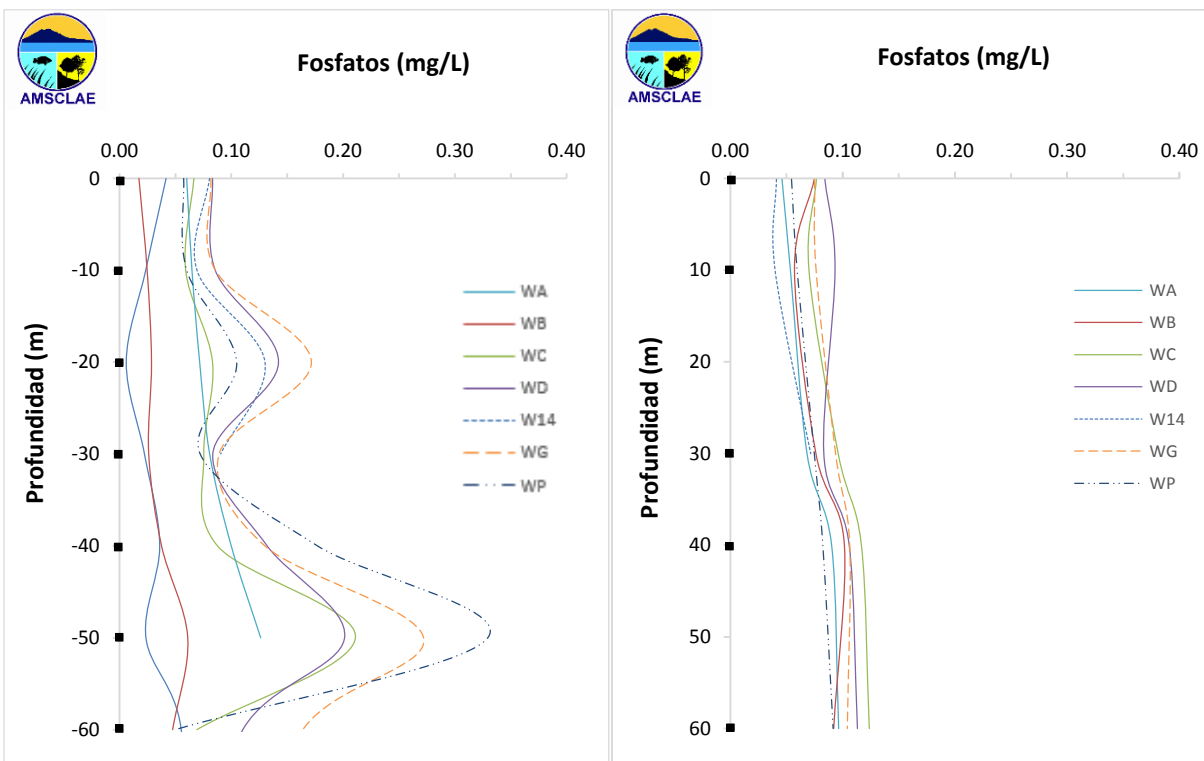


Figura 11. Perfiles de valores promedio de fosfatos durante el 2014 (Izq.) y 2015 (Der.) (DICA/AMSCLAE, 2015). Nota: sobre el eje Y se señalan las profundidades a las que fueron tomadas las muestras de agua.

Nitratos ($\mu\text{g/L}$)

El nitrógeno puede ser utilizado por algas y plantas en tres formas: nitratos (NO_3), ion amonio (NH_4) y nitrógeno molecular (N_2). Las dos primeras es la forma como la toman la mayoría de las plantas y algas; la tercera es propia de los procariontes (bacterias y cianobacterias) (Roldán y Ramírez, 2008). En los primeros 60m las concentraciones de nitratos oscilaron entre los 0.0 y 0.03 mg/L. Las concentraciones de nitratos son mayores en los puntos donde hay un constante ingreso de materia orgánica (*e.i.* WP) y en la capa superficial debido a la fijación de nitrógeno por algunas algas. No obstante, debido al peso de las moléculas, están tienden a sedimentar en las zonas profundas, incrementando su concentración.

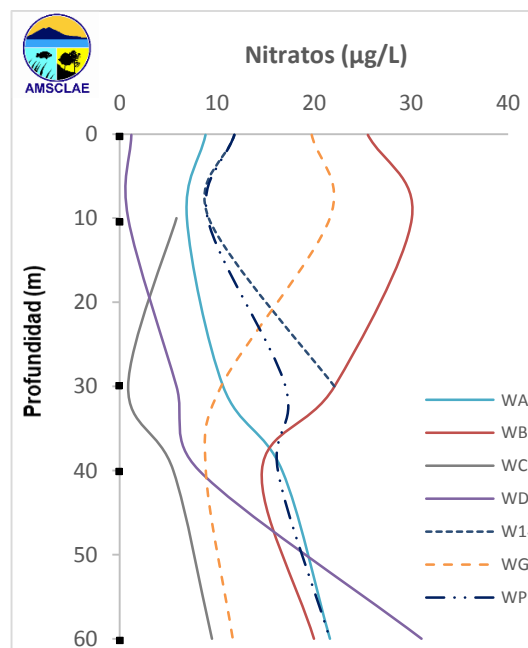


Figura 12. Perfiles de valores promedio de nitratos durante el 2015 (Sep - Oct) (DICA/AMSCLAE, 2015).

Demanda Bioquímica Oxígeno (DBO) (mg/L)

La DBO es una forma de medir la cantidad de materia orgánica presente en el agua y que mientras se degrada consume una considerada cantidad de oxígeno, mientras mayor sea la cantidad de materia orgánica mayor será el consumo de oxígeno disuelto. En la figura 13 se observa que en la mayoría de los puntos de muestreo las concentraciones de DBO fueron similares. En los meses de la temporada seca la DBO fue menor en relación a los meses con lluvias. En el mes de abril se registraron los valores más altos de DBO. Después de las primeras lluvias (Abril) hubo un fuerte arrastre de materia orgánica hacia los ríos y finalmente al lago, la degradación de toda la materia orgánica que ingreso al lago hizo que aumentara la DBO en el mes de abril, lo mismo sucedió en los meses de agosto a octubre donde se registraron lluvias constantes (Informe Clima 2015). En el mes de junio la DBO fue la más baja, esto podría deberse a que en ese mes se dio el fenómeno de la canícula (INSIVUMEH, Boletín 8/2015) en donde no hubo lluvias que arrastraran materia orgánica al lago, por lo tanto no había tanta materia para degradar.

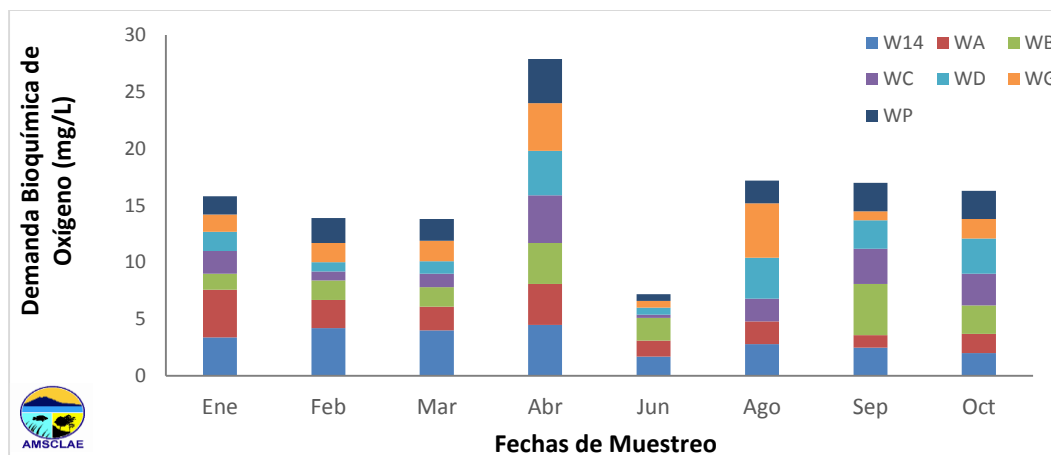


Figura 13. Valores de demanda bioquímica de oxígeno (DBO_{20,5}) por fecha y sitio de muestreo durante el 2015. (DICA/AMSCLAE, 2015).

Clorofila *a* (µg/L)

En la figura 14 se puede observar que durante los primeros meses del año 2014, las concentraciones de clorofila fueron bajas e iniciaron a incrementar a partir del mes de agosto del 2014, en los meses de febrero y marzo del 2015 se registraron las concentraciones más altas. Esto puede indicar que luego de la temporada lluviosa hubo mayor disponibilidad de nutrientes en la columna de agua los cuales fueron absorbidos por las algas, incrementando la densidad de fitoplancton en la capa superficial. Otro factor que pudo favorecer el crecimiento de algas en esos meses fue la radiación solar, la cual es mayor en los meses secos. A partir de marzo se observa que las concentraciones de clorofila disminuyeron, esto podría ser debido a que la mayoría de nutrientes había sido absorbidos los meses anteriores y a que no había ingresos significativos de nutrientes desde los ríos. (Fig. 14).

Clorofila a (mg/L)

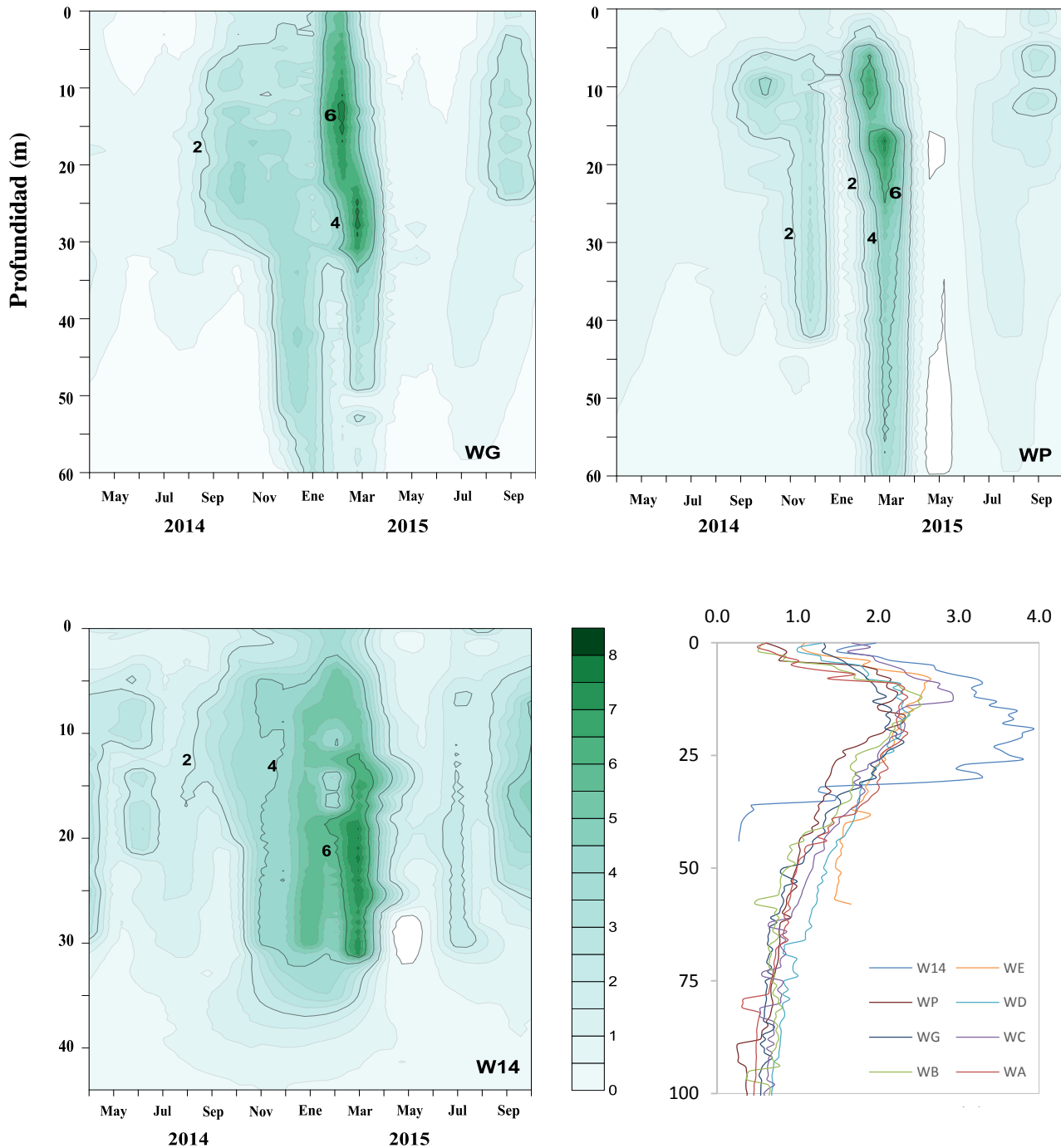


Figura 14. Variación espacial y temporal de Clorofila (α) por sitio de muestreo en el lago Atitlán durante el 2014 y 2015. Perfiles de valores promedio de Clorofila (α) por sitio durante el 2015 (Derecho inferior). (DICA/AMSCLAE, 2015).

Durante los meses de diciembre y enero, si bien las concentraciones de clorofila fueron altas, se pudo observar que las concentraciones disminuyeron un poco en relación a los meses de febrero y marzo (*i.e.*, mapa de contornos de punto de muestro WP). Esto se debe a que en condiciones ambientales extremas (temperaturas bajas y aguas turbulentas) la productividad primara disminuye.

Radiación Fotosintéticamente Activa ($\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

La distribución de la radiación en la columna de agua tiene un efecto en la distribución de las comunidades de plancton. Desde el punto de vista limnológico, la luz que penetra en el agua es afectada por la latitud, la altitud, la época del año, la hora del día y las condiciones climáticas. En la figura 15 se puede observar que en el primeros metros de profundidad (0 - 2m) la intensidad de la luz es mayor e inicia a atenuarse a partir de los 3m. Este efecto se puede ver reflejado en el desarrollo del fitoplancton en la superficie. En los primeros metros de profundidad la densidad de algas (Fig. 14) es menor, ya que probablemente a una determinada intensidad luminosa el fitoplancton deja de fotosintetizar debido a que se degradan los pigmentos. Entre los 10 y 30m las condiciones físicas y químicas puede que sean mejores ya que las algas incrementan su eficiencia fotosintética (Fig. 14), tal vez como respuestas a una mayor disponibilidad de nutrientes y una intensidad lumínica adecuada (Pinilla, 2005). Finalmente, cabe mencionar que en el año 2015 hubo mayor radiación solar en comparación con el año 2014 (Fig. 15), esto pudo favorecer el bloom del mes de agosto (Informe Clima 2015).

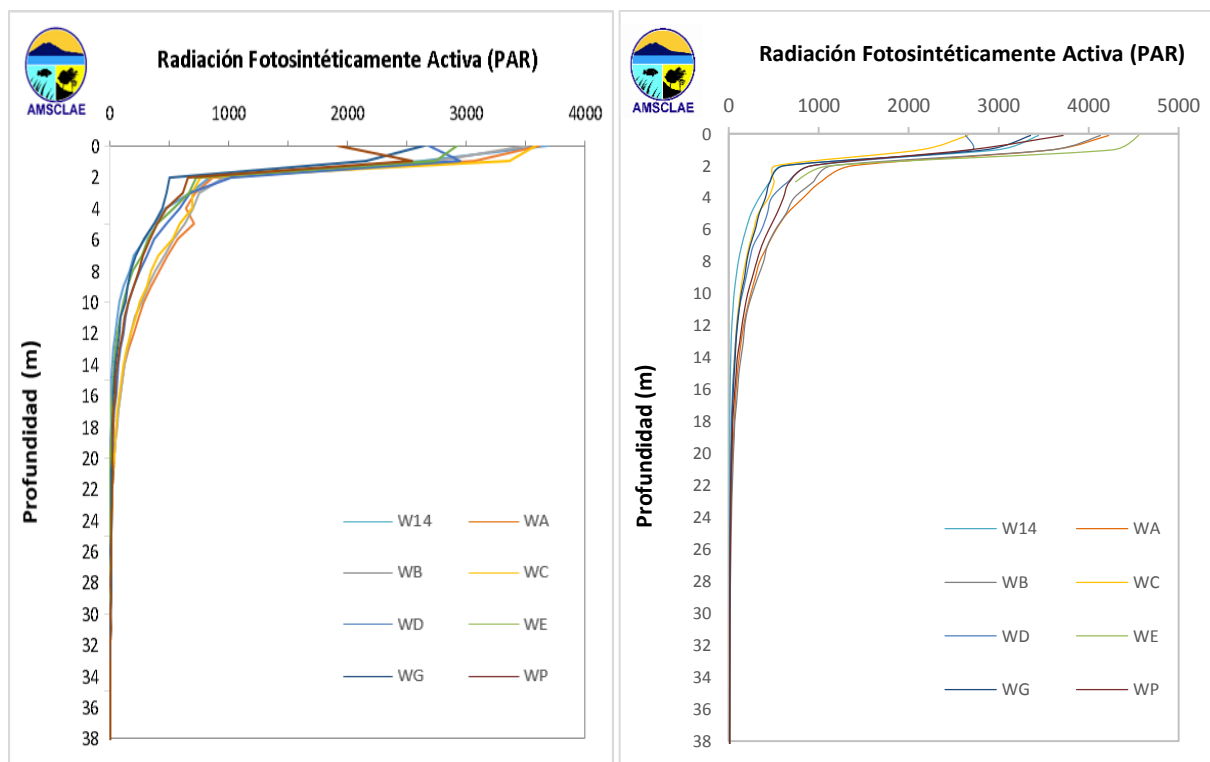


Figura 15. Perfiles de valores promedio de Radiación fotosintéticamente activa ($\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$) durante el 2014 (Izq.) y 2015 (Der.) (DICA/AMSCLAE, 2015).

Coliformes totales y *E. coli*

Los coliformes son indicadores de polución de origen fecal, como resultado de una contaminación frecuente humana o animal. En la figura 16 se pueden observar los valores de coliformes totales y *E. coli* de los sitios de muestreo, la mayoría de los sitios presentaron valores por abajo de los 200UFC. Los sitios con mayor número coliformes totales y *E. coli* fueron el W14 y WP. Esto podría deberse a que todos los sitios, excepto el WG, se encuentran fuertemente influenciados por descargas de aguas residuales. El sitio WP se encuentra muy cercano al delta del Río San Francisco, el cual está muy alterado desde la parte media de la cuenca por descargas de aguas grises y negras sin tratar, por lo tanto tienen un alto número de microorganismos y patógenos.

En general durante el mes de febrero y marzo se registraron los valores más altos de coliformes totales y *E. coli*, esto podría deberse a algún evento de lluvia que ocurrió días previos al muestreo, que arrastro por escorrentía material de origen fecal presente en la cuenca (DICA/Clima, 2015a). La influencia de las descargas de los ríos, aguas pluviales y residuales provenientes de los poblados que se encuentran dentro de la cuenca del Lago de Atitlán puede incrementar la cantidad de coliformes totales y *E. coli* dentro del lago.

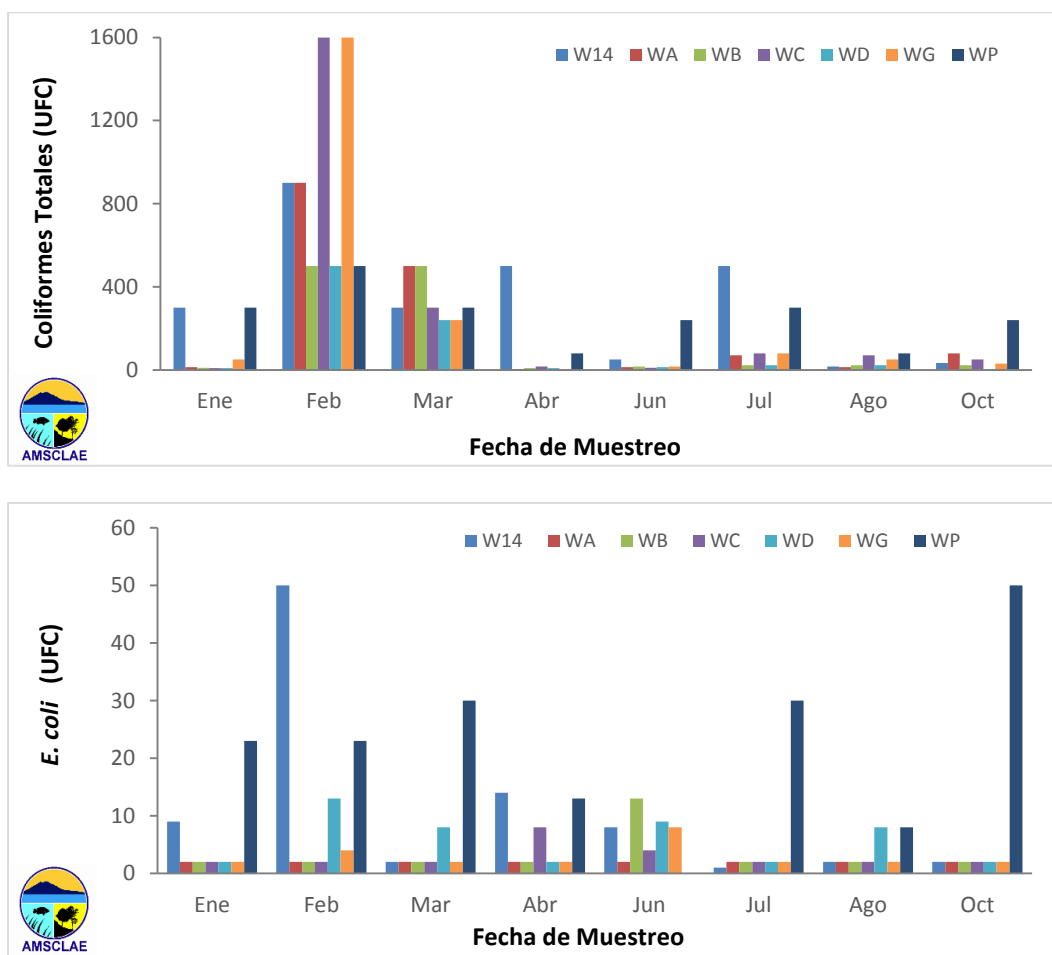


Figura 16. Valores de coliformes totales y *E. coli* durante el 2015 (DICA/AMSCLAE, 2015).

Fitoplancton

Durante el año 2015, se identificaron 22 géneros (Anexo 2) distribuidos en cinco clases distintas: algas verdes (Chlorophyta), cianobacterias (Cyanophyta), diatomeas (Bacillariophyta), algas quebradizas (Charophyta) y dinoflagelados (Dinophyta). Se reportaron cinco géneros nuevos (que no habían sido antes registrados), dos cianobacterias *Chroococcus* y *Dolichospermum*; dos diatomeas *Nitzschia* y *Tabellaria* y un alga quebradiza *Closterium*.

En general, en el lago Atitlán dominan las diatomeas (Bacillariophyta) siendo las más comunes las de los géneros *Aulacoseira* y *Fragilaria*. Entre las algas verdes (Chlorophyta) que comúnmente se pueden encontrar en el lago Atitlán están *Staurastrum* y *Pediastrum*. La cianobacteria (Cyanophyta) que generalmente está presente en el lago Atitlán es *Limnographis*, misma que causó el florecimiento registrado en agosto; y en el cual se registró por primera vez el género *Dolichospermum*. Únicamente hay dos géneros de algas quebradizas (Charophyta), siendo éstas *Closterium* y *Mougeotia*, esta última puede codominar en ciertas ocasiones con *Aulacoseira* (Fig. 17).

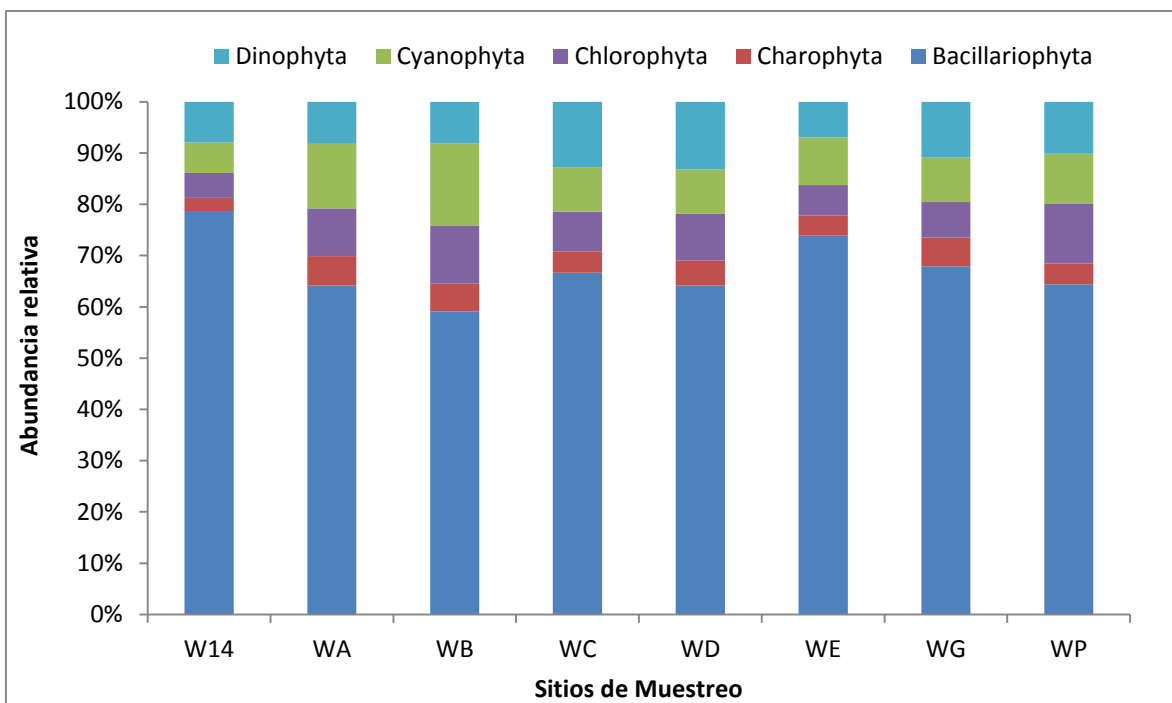


Figura 17. Ensamble de fitoplancton por sitio de muestreo (DICA/AMSCLAE, 2015).

El comportamiento del fitoplancton a lo largo del año es similar para el 2014 y 2015 (Fig. 18). Existe una dominancia de diatomeas en los meses más fríos (nov-feb) ya que son organismos que prefieren aguas frías y presencia de fuertes vientos (Ochaeta, 2014). En abril de ambos años se reportó codominancia de diatomeas y algas verdes, éstas últimas se ven favorecidas por aguas más cálidas y altas concentraciones de nutrientes (nitrógeno y fósforo) (Ochaeta, 2014). En los meses de julio del 2014 y agosto del 2015 se puede observar un aumento de cianobacterias, dada por el florecimiento reportado para ambos meses.

Las cianobacterias se ven favorecidas por las altas temperaturas, radiación solar y por altas concentraciones de nutrientes (Ochaeta, 2014; Bellinger & Sigeo, 2010), lo que está asociado al impacto de las lluvias que arrastran nutrientes al lago Atitlán. En los meses de abril del 2014 y junio del 2015, se registró un aumento en la abundancia relativa de los dinoflagelados (Dinophyta), lo que podría deberse a la falta de zooplancton capaz de alimentarse de este grupo de algas, ya que los organismos del género *Ceratium* son significativamente más grandes que el resto de algas (Fig. 18) (Bellinger & Sigeo, 2010).

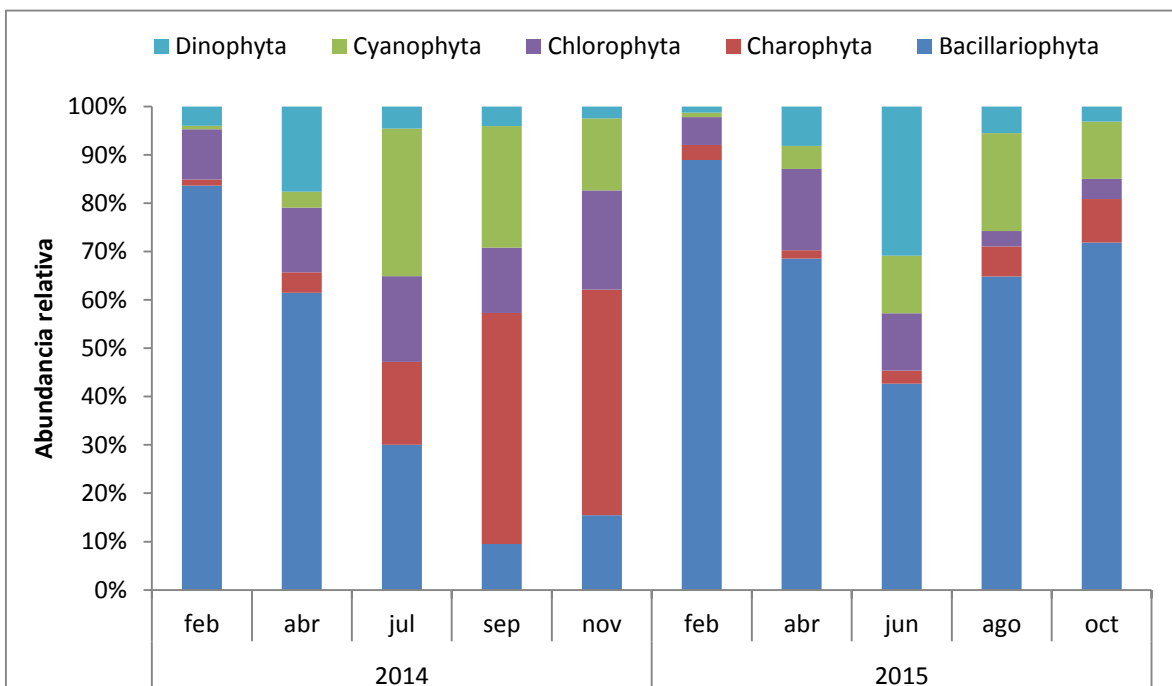


Figura 18. Ensamble de fitoplancton durante los años 2014 y 2015 del lago Atitlán (DICA/AMSCLAE, 2015).

4. CONCLUSIONES

En los últimos diez años la transparencia del agua, la cantidad de oxígeno disuelto en la superficie y en las zonas profundas y la calidad del agua fisicoquímica y microbiológica ha ido disminuyendo. Esto está altamente relacionado con el ingreso continuo de sedimentos y aguas residuales al lago. Estas actividades ponen en alto riesgo la calidad del agua tanto para la población humana como para las comunidades acuáticas, ya que hay muchas actividades económicas, sociales, culturales entre otras, que dependen directamente del recurso acuático.

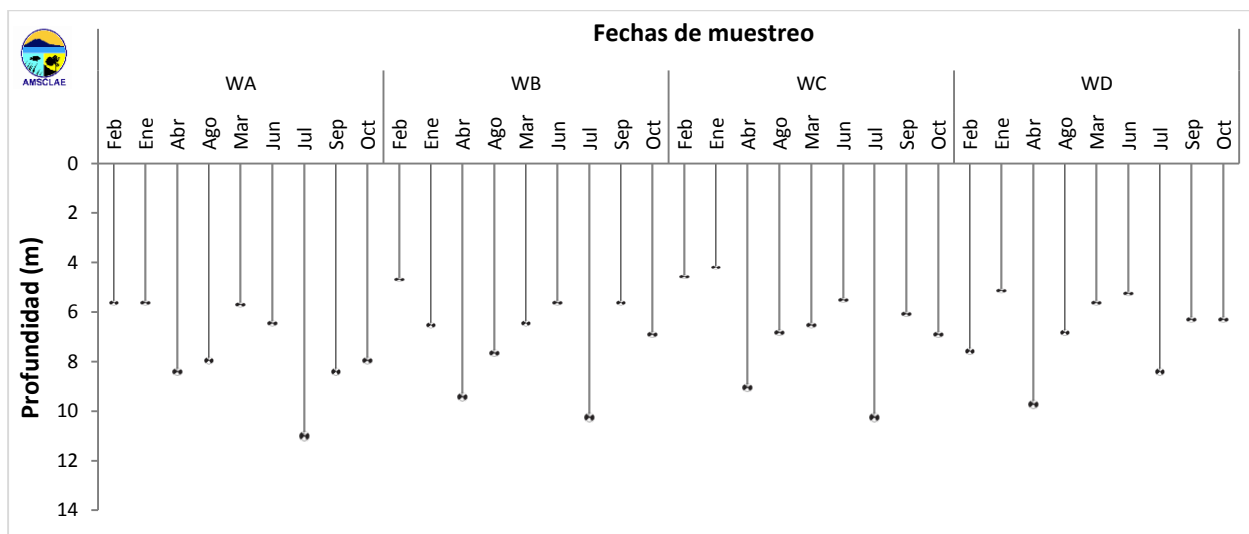
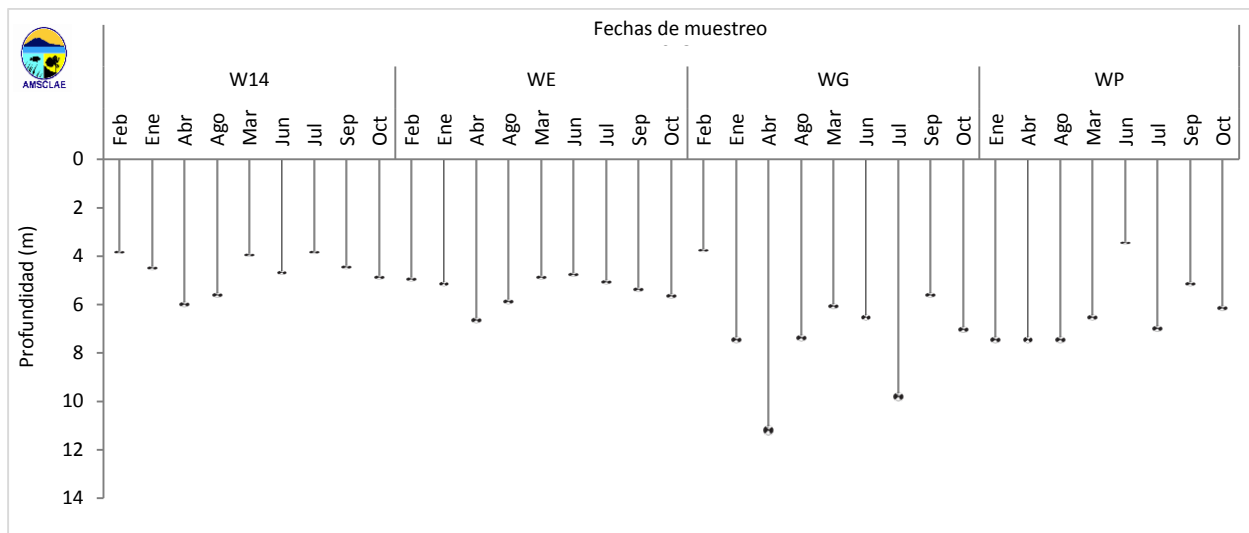
Es importante continuar con los proyectos de saneamiento ambiental y agroforestales para poder reducir el impacto que tienen estas actividades sobre el lago de Atitlán. Asimismo, es importante continuar con el programa de monitoreo de forma constante en tiempo y espacio, para tener datos que nos permita comprender el comportamiento del ecosistema del lago de Atitlán en el futuro, con el fin de poder tomar o establecer mejores criterios en la toma de decisiones sobre la conservación y manejo de los recursos acuáticos en Guatemala.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APHA-AWWA-WPCF (1992) Métodos Normalizados, para el análisis de aguas potables y residuales. , Ediciones Díaz de Santos, S.A. España
- Bellinger, E. y Sigeo, D. (2010). Freshwater algae: identification and use as bioindicators. Ltd. Chippenham, Wilts: Gran Bretaña. 285 p.
- Chandra, S., E. Rejmánková, M. Dix, N. Girón, V. Mosquera *et al.* 2014. Estado del Lago Atitlán Informe 2014. Unidos por el Lago Atitlán – Universidad del Valle de Guatemala, Campus Altiplano, Centro de Estudios Atitlán. Sololá, Guatemala. 33 pp.
- Confederación Hidrográfica del Ebro, URS, Vicente, E., de Hoyos, C., Sánchez, P., Cambra, J. (2005). Protocolos de muestreo y análisis para fitoplancton [en línea]. Recuperado 02 de diciembre, 2013. http://195.55.247.234/webcalidad/estudios/indicadoresbiologicos/Manual_fitoplancton.pdf
- DICA/Clima. 2015a. Informe Monitoreo Climático 2014. Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Atitlán y su Entorno. Panajachel, Sololá. 10 pp.
- DICA/Clima. 2015b. Informe Monitoreo de Caudales 2014. Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Atitlán y su Entorno. Panajachel, Sololá. 5 pp.
- Horne, A. & C. Goldman. 1994. Limnology. McGraw-Hill, Inc., EEUU. 575 pp.
- Lamper, W. & U. Sommer. 2007. Limnoecology. Oxford University Press, Oxford, Great Britain. 335pp.
- Ley de Creación de la AMSCLAE y su reglamento. Decreto número 133-96 del congreso de la República y Acuerdo Gubernativo No. 78-2012. 45 pp.
- Löffler, H. 2004. The origin of lake basins, p. 8- 60. In P.E. O'Sullivan & C. S. Reynolds (Eds.). The lakes handbook. Blackwell Science Ltd., Cornwall, United Kingdom.
- Ochaeta Constanza, G. (2014). Análisis temporal y espacial de la comunidad de fitoplancton en los puntos Panajachel, Centro Weiss G y Santiago en el Lago Atitlán, Sololá, Guatemala, durante el año 2013. Tesis Biol. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia: Universidad de San Carlos de Guatemala. 78p.
- Pinilla Agudelo, G.A. 2005. Ecología del fitoplancton en un lago amazónico de aguas claras (Lago Boa, Caquetá, Media República de Colombia). Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Bogotá, Colombia.
- Pokorný, J. & J. Květ. Aquatic plants and lake ecosystems, p. 309 – 340. In P.E. O'Sullivan & C. S. Reynolds (Eds.). The lakes handbook. Blackwell Science Ltd., Cornwall, United Kingdom.
- Roldán, G. y Ramírez J. (2008). Fundamentos de limnología neotropical. Editorial universidad de Antioquía. 2da. Edición. Colombia. 440 pp.
- Reynolds, C. 2004a. Lakes, limnology and limnetic ecology: towards a new synthesis, p. 1 – 7. In P.E. O'Sullivan & C. S. Reynolds (Eds.). The lakes handbook. Blackwell Science Ltd., Cornwall, United Kingdom
- Reynolds, C. 2004b. Physical properties of water relevant to limnology and limnetic ecology, p. 107 - 114. In P.E. O'Sullivan & C. S. Reynolds (Eds.). The lakes handbook. Blackwell Science Ltd., Cornwall, United Kingdom
- Weiss, C.M., (1971). Water quality investigations in Guatemala. Lake Atitlán 1968-1970. University of North Carolina. 175pp.
- WHO. World Health Organization. (2000). Monitoring Bating Waters – A Practical Guide to the Design and Implementation of Assessments and Monitoring Programmes. London: F & FN Spon.

ANEXOS

Anexo 1. Valores de transparencia por sitio durante el 2015 (DICA/AMSCLAE, 2015).



Anexo 2. Composición de la comunidad fitoplanctónica del lago Atitlán durante el 2015 (DICA, 2015)

Febrero

Clase/Género	W14	WA	WB	WC	WD	WE	WG	WP
Bacillariophyta	692	675	660	749	716	751	730	719
<i>Aulacoseira espiral</i>	51	41	37	41	47	34	31	30
<i>Aulacoseira recta</i>	559	618	590	655	629	664	665	654
<i>Cymbella</i>						1		
<i>Diatoma</i>	2						1	
<i>Fragilaria</i>	80	12	28	51	35	52	33	34
<i>Navicula</i>		1						
<i>Nitzschia</i>		3	5	2	5			1
Charophyta	8	38	47	12	18	8	35	34
<i>Closterium</i>	1		12	1	3	2	4	4
<i>Mougeotia</i>	7	38	35	11	15	6	31	30
Chlorophyta	35	84	80	32	57	12	28	39
<i>Botryococcus</i>		8						
<i>Coelastrum</i>	18	34	50	14	19	3	7	16
<i>Oocystis</i>		2						
<i>Pediastrum</i>	5	2	2	3	2	3	3	2
<i>Sphaerocystis</i>		2	5				2	1
<i>Staurastrum</i>	12	35	23	14	36	6	16	20
<i>Volvox</i>		1		1				
Cyanophyta	15		9	2	7	18	5	6
<i>Aphanizomenon</i>				2				
<i>Limnoraphis</i>					1		2	
<i>Microcystis</i>	15		9		6	18	3	6
Dinophyta	50	3	4	5	2	11	2	2
<i>Ceratium</i>	50	3	4	5	2	11	2	2

Anexo 2. Continuación. Composición de la comunidad fitoplanctónica del lago Atitlán durante el 2015 (DICA, 2015)

Abril

Clase/Género	W14	WA	WB	WC	WD	WE	WG	WP
Bacillariophyta	656	615	466	516	475	639	597	423
<i>Aulacoseira espiral</i>	252	20	52	35	52	148	50	33
<i>Aulacoseira recta</i>	15	355	81	27	26	11	22	25
<i>Cymbella</i>		1		1				2
<i>Diatoma</i>	1		1		4	8	2	2
<i>Fragilaria</i>	386	235	332	452	392	472	518	356
<i>Nitzschia</i>	2	4		1	1		5	5
Charophyta	11	15	15	11	16	11	17	13
<i>Closterium</i>	6	14	14	8	16	8	15	12
<i>Mougeotia</i>	5	1	1	3		3	2	1
Chlorophyta	81	110	176	138	160	92	84	235
<i>Botryococcus</i>					6			
<i>Coelastrum</i>	33	26	14	7	6	38	9	52
<i>Oocystis</i>		2	1		1			
<i>Pediastrum</i>	22	14	36	37	25	25	26	57
<i>Sphaerocystis</i>	5	36	59	40	63	3	7	45
<i>Staurastrum</i>	20	32	63	50	58	26	42	79
<i>Volvox</i>	1		3	4	1			2
Cyanophyta	9	31	80	57	55	8	27	40
<i>Aphanizomenon</i>						1		
<i>Limnoraphis</i>	1					2	4	1
<i>Microcystis</i>	8	31	80	57	55	5	23	39
Dinophyta	43	29	63	78	94	50	75	89
<i>Ceratium</i>	43	29	63	78	94	50	75	89

Anexo 2. Continuación. Composición de la comunidad fitoplanctónica del lago Atitlán durante el 2015 (DICA, 2015)

Junio

Clase/Género	W14	WA	WB	WC	WD	WE	WG	WP
Bacillariophyta	552	282	255	286	225	499	331	301
<i>Aulacoseira espiral</i>	1	3	5	3	4		4	5
<i>Aulacoseira recta</i>	306	81	40	13	13	240	21	56
<i>Diatoma</i>	4	2	1	4	8	6		1
<i>Fragilaria</i>	241	196	209	266	200	252	306	239
<i>Navicula</i>						1		
Charophyta	17	38	20	5	9	43	23	17
<i>Closterium</i>	9	25	13	4	5	9	17	15
<i>Mougeotia</i>	8	13	7	1	4	34	6	2
Chlorophyta	39	104	125	88	93	74	117	119
<i>Botryococcus</i>	3	26	23	31	22	9	28	18
<i>Coelastrum</i>						14		
<i>Oocystis</i>			2					
<i>Pediastrum</i>	20	5	3	6	8	17	3	3
<i>Staurastrum</i>	16	72	97	50	61	33	85	98
<i>Volvox</i>		1		1	2	1	1	
Cyanophyta	27	156	209	77	94	39	57	106
<i>Aphanizomenon</i>	14	127	170	52	56	27	29	95
<i>Chroococcus</i>	1				1		1	
<i>Limnoraphis</i>		1		1	1			1
<i>Microcystis</i>	12	28	39	24	36	12	27	10
Dinophyta	165	220	191	344	379	145	272	257
<i>Ceratium</i>	165	220	191	344	379	145	272	257

Anexo 2. Continuación. Composición de la comunidad fitoplanctónica del lago Atitlán durante el 2015 (DICA, 2015)

Agosto

Clase/Género	W14	WA	WB	WC	WD	WE	WG	WP
Bacillariophyta	545	470	457	558	569	476	561	513
<i>Aulacoseira espiral</i>	18	52	52	58	85	34	94	73
<i>Aulacoseira recta</i>	360	239	231	269	269	256	223	210
<i>Cymbella</i>		1			1			
<i>Diatoma</i>	7	1	1	1	1	6		1
<i>Fragilaria</i>	157	175	173	227	211	178	244	226
<i>Navicula</i>						1		
<i>Nitzschia</i>	2	1		2	1	1		3
Tabellaria	1	1		1	1			
Charophyta	35	63	63	46	61	37	42	53
<i>Closterium</i>	7	29	13	10	12	15	6	8
<i>Mougeotia</i>	28	34	50	36	49	22	36	45
Chlorophyta	25	31	25	16	27	33	16	31
<i>Botryococcus</i>	4	13	8	6	7	9	9	6
<i>Coelastrum</i>	1	2				2		
<i>Oocystis</i>		1		2				
<i>Pediastrum</i>	9	2	1		1	6	1	2
<i>Staurastrum</i>	11	13	16	8	19	16	6	23
Cyanophyta	148	188	230	130	105	199	130	166
<i>Aphanizomenon</i>		2	1	6		3	2	7
<i>Dolichospermum</i>	123	62	54	17	29	126	13	33
<i>Limnorphis</i>	20	109	140	79	62	56	103	110
<i>Microcystis</i>	5	15	35	28	14	14	12	16
Dinophyta	47	48	25	50	38	55	51	37
<i>Ceratium</i>	47	48	25	50	38	55	51	37

Anexo 2. Continuación. Composición de la comunidad fitoplanctónica del lago Atitlán durante el 2015 (DICA, 2015)

Octubre

Clase/Género	W14	WA	WB	WC	WD	WE	WG	WP
Bacillariophyta	704	524	526	557	580	591	496	621
<i>Aulacoseira espiral</i>	16	2			1	4		
<i>Aulacoseira recta</i>	255	452	441	475	503	305	404	561
<i>Cymbella</i>	4						1	
<i>Diatoma</i>	15			2	4	1		1
<i>Fragilaria</i>	413	70	84	79	72	279	91	58
<i>Navicula</i>						1		
<i>Nitzschia</i>			1	1				1
Tabellaria	1					1		
Charophyta	31	76	71	94	93	58	109	44
<i>Closterium</i>	16	29	35	32	51	29	43	22
<i>Mougeotia</i>	15	47	36	62	42	29	66	22
Chlorophyta	14	43	50	34	27	26	31	41
<i>Botryococcus</i>	1	5	3	4	4	1	5	4
<i>Coelastrum</i>	1	2	10	4	6	4	5	2
<i>Oocystis</i>		2						
<i>Pediastrum</i>	3	2	1	1		4	1	4
<i>Staurastrum</i>	9	32	36	25	17	16	20	31
<i>Volvox</i>						1		
Cyanophyta	38	129	111	82	86	108	130	75
<i>Aphanizomenon</i>					1			
<i>Dolichospermum</i>	28	15	21	7	6	27	10	11
<i>Limnoraphis</i>	9	106	72	73	77	81	112	64
<i>Microcystis</i>	1	8	18	2	2		8	
Dinophyta	13	28	42	33	14	17	34	19
<i>Ceratium</i>	13	28	42	33	14	17	34	19