

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA

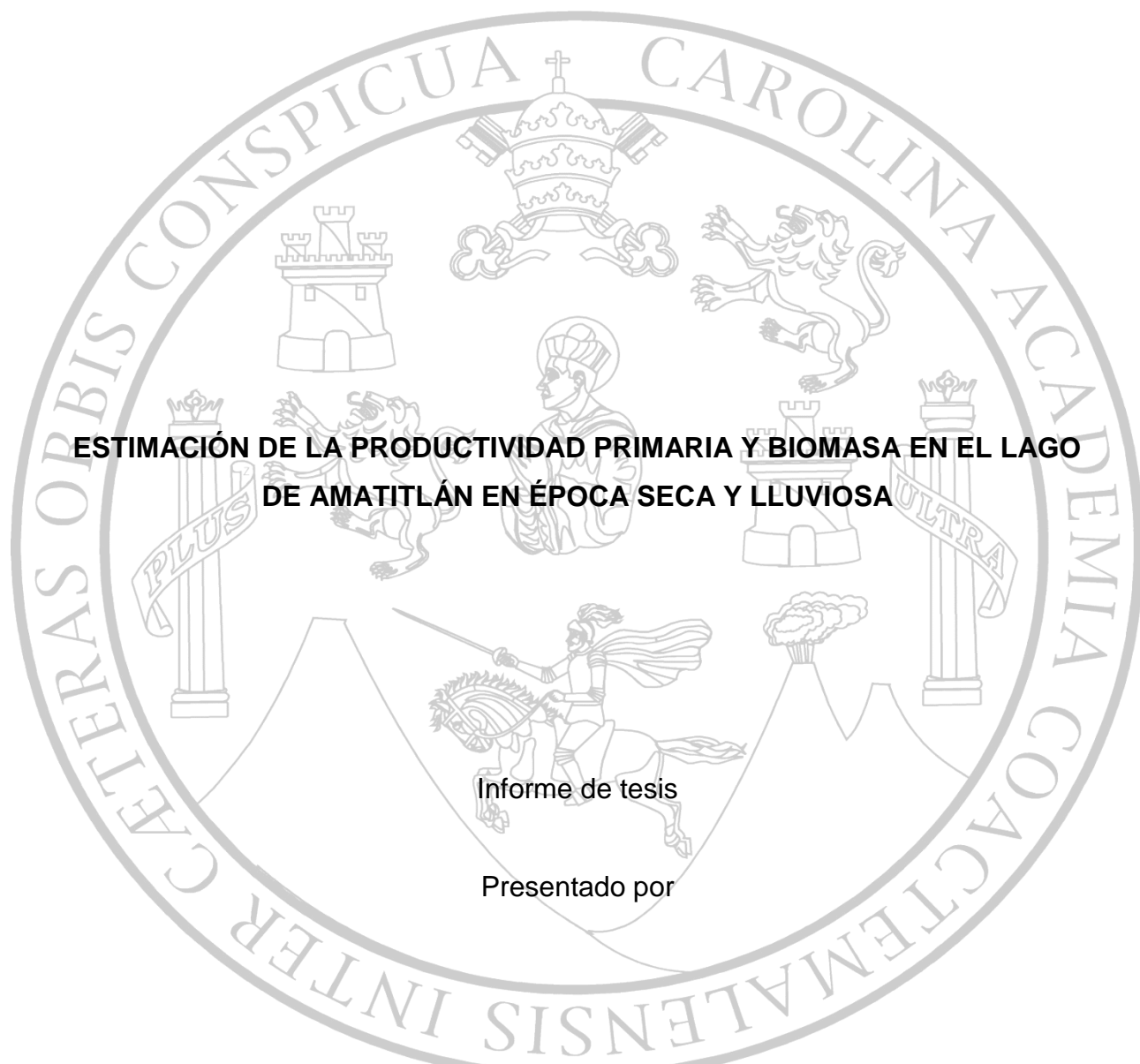


**ESTIMACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA Y BIOMASA EN EL LAGO
DE AMATITLÁN EN ÉPOCA SECA Y LLUVIOSA**

Andrea Alejandra Azurdía Juárez
Química

Guatemala, Agosto 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA



**ESTIMACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA Y BIOMASA EN EL LAGO
DE AMATITLÁN EN ÉPOCA SECA Y LLUVIOSA**

Informe de tesis

Presentado por

Andrea Alejandra Azurdía Juárez

Para optar al título de

Química

Guatemala, Agosto del 2016

JUNTA DIRECTIVA

Dr. Rubén Dariel Velásquez Miranda	Decano
Licda. Elsa Julieta Salazar Meléndez de Ariza, M.A.	Secretaria
MSc. Miriam Carolina Guzmán Quilo	Vocal I
Dr. Juan Francisco Pérez Sabino	Vocal II
Lic. Carlos Manuel Maldonado Aguilera	Vocal III
Br. Andreina Delia Irene López Hernández	Vocal IV
Br. Carol Andrea Betancourt Herrera	Vocal V

ACTO QUE DEDICO

A Dios

A mi país, Guatemala

A mis papas: Armando Azurdia y Clara luz Juárez

A mis hermanas: Luz María y Cristina Azurdia

A mis bebes: Cristopher, Natalia y Santiago

A mi novio, Milton

A todas las personas que me han acompañado a lo largo de estos años, familia,
amigos, catedráticos

AGRADECIMIENTOS

Cuando me preguntaban de niña que quería ser cuando fuera grande decía que quería estudiar arqueología o ser científica. Conforme uno va creciendo los prejuicios de otros se van convirtiendo en propios, desarmando todos estos sueños. Así que crecí buscando encajar en alguna de esas profesiones que si estaban permitidas, suerte que no encontré ninguna.

Así que hoy agradezco a Dios el haberme guiado hacia mi sueño de infancia o lo más cercano que se puede ser de un científico. Por haberme dado el privilegio de amar mi profesión.

A mis papas por acompañarme en esta travesía y ser mi respaldo en todo momento.

A mis hermanas que siempre han estado ahí como motivo de inspiración.

A mis 4 bebes, Christopher, Natalia, Santiago y la Miel, por llenar mi vida de mucha alegría.

A mi Milton por apoyarme en todas mis aventuras.

A la familia, a los amigos.

Un agradecimiento especial a la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA), en particular a la División de control, calidad ambiental y manejo de lagos cuyo apoyo fue vital para el desarrollo de la presente investigación.

ÍNDICE

I. RESUMEN.....	1
II. INTRODUCCIÓN	3
III. ANTECEDENTES	5
A. Descripción del cuerpo de agua	5
1. La cuenca del río María Linda y la subcuenca del lago de Amatitlán	5
2. Lago de Amatitlán	7
B. Problemas de contaminación en la cuenca y en el lago de Amatitlán	9
1. Escasos controles en la producción industrial	9
2. Vertido de residuos líquidos.....	12
3. Manejo deficiente de residuos sólidos	15
4. Uso inadecuado del suelo.....	15
5. Erosión y desestabilización de los ríos de la cuenca del lago de Amatitlán:	16
C. Propiedades fisicoquímicas en sistemas acuáticos.....	18
1. Transparencia:	18
a) Transparencia en el lago de Amatitlán:	19
2. Temperatura	22
a) Temperatura en el lago de Amatitlán.....	24
3. Potencial de hidrógeno (pH)	29
a) Potencial de hidrógeno (pH) en el lago de Amatitlán.....	29
4. Oxígeno disuelto	34
a) Porcentaje de saturación de oxígeno:	35
b) Oxígeno disuelto en el lago de Amatitlán	36
5. Nitrógeno	41
a) Fijación microbológica de nitrógeno molecular	42
b) Fijación microbológica de nitrógeno molecular en el lago de Amatitlán.....	42
c) Nitrógeno total	43

d) Nitrógeno de amonio	44
e) Nitrógeno de nitratos y nitritos	45
f) Nitrógeno en el lago de Amatitlán.....	47
6. Fósforo.....	51
a) Fosforo Total:	52
b) Fósforo de ortofosfatos.....	53
c) Fósforo en el lago de Amatitlán	54
D. Productividad primaria fitoplanctónica.....	55
1. Productividad primaria y eutrofización:	56
2. Productividad primaria en lagos con características tropicales:.....	58
E. Biomasa fitoplanctónica.....	60
IV. JUSTIFICACIÓN.....	63
V. OBJETIVOS.....	65
VI. HIPÓTESIS.....	66
VII. MATERIALES Y MÉTODOS.....	67
A. Universo	67
B. Muestra.....	67
C. Materiales.....	68
1. Equipo.....	68
2. Reactivos	68
3. Cristalería	69
D. Métodos.....	70
1. Diseño de la investigación:	70
2. Análisis estadístico:	70
3. Muestreo:.....	70
4. Procedimiento:.....	71
a) Estimación de la productividad primaria	71
i. Incubación.....	71
ii. Determinación de oxígeno disuelto (OD), por método Winkler:	72
iii. Cálculos para la estimación de la productividad primaria:.....	74

b) Estimación de la biomasa fitoplanctonica a través de la detrmnación de la clorofila a	75
i. Almacenamiento de la Muestra:.....	75
ii. Determinación de la clorofila a (Nusch & Palme, 1975)	75
iii. Cálculos para la estimación de la clorofila a.....	77
IX. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	89
X. CONCLUSIONES	97
XI. RECOMENDACIONES	99
XII. BIBLIOGRAFÍA	100
XIII. ANEXOS	104

ÍNDICE DE FIGURAS

No.	Título	Página
1	La cuenca y subcuencas del río María Linda.	6
2	Relieve lago de Amatitlán.	8
3	Platanitos Cuenca Alta, fotos tomadas en Enero 2014 y Junio 2014.	17
4	Tipos de erosión del suelo.	17
5	Transparencia medida en metros del año 2013, en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán.	21
6	Transparencia medida en metros del año 2013, en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán.	21
7	Valores medios de temperatura en grados Celsius (°C), durante las décadas de 1970 a 1979, 1990 a 1999 y de 2000 a 2008, en diferentes sitios de muestreo del lago de Amatitlán.	25
8	Valores medios de temperatura en grados Celsius (°C), en época seca y lluviosa durante las décadas de 1970 a 1979, 1990 a 1999 y de 2000 a 2008, del lago de Amatitlán.	26
9	Perfiles de temperatura medida en grados Celsius (°C), del año 2013 del sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán.	28
10	Perfiles de temperatura medida en grados Celsius (°C), del año 2013 del sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán.	28
11	Valores medios de potencial de hidrógeno (pH), durante las décadas 1960 a 1969, 1970 a 1979, 1980 a 1989, 1990 a 1999 y de 2000 a 2008, en diferentes sitios de muestreo del lago de Amatitlán.	30
12	Valores medios de potencial de hidrógeno (pH), en época seca y lluviosa durante las décadas de 1960 a 1969, 1970 a 1979, 1980 a 1989, 1990 a 1999 y de 2000 a 2008, del lago de Amatitlán.	31
13	Perfiles de potencial de hidrógeno (pH), del año 2013 del sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán.	33
14	Perfiles de potencial de hidrógeno (pH), del año 2013 del sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán.	33
15	Valores medios de la concentración de oxígeno disuelto en mg/L durante las décadas 1970 a 1979, 1980 a 1989, 1990 a 1999 y de 2000 a 2008, en diferentes sitios de muestreo del lago de Amatitlán.	37

16	Valores medios de las concentraciones de oxígeno disuelto en mg/L en época seca y lluviosa durante las décadas de 1960 a 1969, 1970 a 1979, 1980 a 1989, 1990 a 1999 y de 2000 a 2008, del lago de Amatitlán.	38
17	Perfiles de las concentraciones de oxígeno disuelto medido en mg/L durante la época seca del año 2013, en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán.	39
18	Perfiles de las concentraciones de oxígeno disuelto medido en mg/L durante la época lluviosa del año 2013, en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán.	39
19	Perfiles de las concentraciones de oxígeno disuelto medido en mg/L durante la época seca del año 2013, en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán.	40
20	Perfiles de las concentraciones de oxígeno disuelto medido en mg/L durante la época lluviosa del año 2013, en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán.	40
21	Valores medios de la concentración de nitrógeno total en mg/L durante las décadas 1960 a 1969, 1970 a 1979, 1980 a 1989, 1990 a 1999 y de 2000 a 2008, en diferentes sitios de muestreo del lago de Amatitlán.	48
22	Valores medios de la concentración de nitrógeno total en mg/L durante las décadas 1960 a 1969, 1970 a 1979, 1980 a 1989, 1990 a 1999 y de 2000 a 2008, en diferentes sitios de muestreo del lago de Amatitlán.	54
23	Aumento generalizado de la productividad fitoplanctónica por unidad de volumen de agua en sistemas con diferentes estados tróficos.	57
24	Transparencia medida en metros por medio de disco Secchi, tomada en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en marzo del 2014 a enero del 2015.	123
25	Clorofila <i>a</i> expresada en mg/m ² , tomada en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en marzo del 2014 a enero del 2015.	123
26	Productividad primaria bruta, productividad primaria neta y respiración expresada en mg C/m ² d, tomada en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en marzo del 2014 a enero del 2015.	124
27	Coefficiente de asimilación de carbono expresado en mg C/mg clorofila- <i>a</i> *d, tomada en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en marzo del 2014 a enero del 2015.	124

28	Perfil de clorofila <i>a</i> expresada en mg/m ³ , tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en marzo del 2014.	125
29	Perfil de productividad primaria bruta, productividad primaria neta y respiración expresada en mg C/m ³ d, tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en marzo del 2014.	125
30	Perfil de clorofila <i>a</i> expresada en mg/m ³ , tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en mayo del 2014.	126
31	Perfil de productividad primaria bruta, productividad primaria neta y respiración expresada en mg C/m ³ d, tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en mayo del 2014.	126
32	Perfil de clorofila <i>a</i> expresada en mg/m ³ , tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en julio del 2014.	127
33	Perfil de productividad primaria bruta, productividad primaria neta y respiración expresada en mg C/m ³ d, tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en julio del 2014.	127
34	Perfil de clorofila <i>a</i> expresada en mg/m ³ , tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en septiembre del 2014.	128
35	Perfil de productividad primaria bruta, productividad primaria neta y respiración expresada en mg C/m ³ d, tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en septiembre del 2014.	128
36	Perfil de clorofila <i>a</i> expresada en mg/m ³ , tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en noviembre del 2014.	129
37	Perfil de productividad primaria bruta, productividad primaria neta y respiración expresada en mg C/m ³ d, tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en noviembre del 2014.	129
38	Perfil de clorofila <i>a</i> expresada en mg/m ³ , tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en enero del 2015.	130
39	Perfil de productividad primaria bruta, productividad primaria neta y respiración expresada en mg C/m ³ d, tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en enero del 2015.	130

40	Transparencia medida en metros por medio de disco Secchi, tomada en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en marzo del 2014 a enero del 2015.	131
41	Clorofila <i>a</i> expresada en mg/m ² , tomada en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en marzo del 2014 a enero del 2015.	131
42	Productividad primaria bruta, productividad primaria neta y respiración expresada en mg C/m ² d, tomada en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en marzo del 2014 a enero del 2015.	132
43	Coefficiente de asimilación de carbono expresado en mg C/mg clorofila- <i>a</i> *d, tomada en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en marzo del 2014 a enero del 2015.	132
44	Perfil de clorofila <i>a</i> expresada en mg/m ³ , tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en marzo del 2014.	133
45	Perfil de productividad primaria bruta, productividad primaria neta y respiración expresada en mg C/m ³ d, tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en marzo del 2014.	133
46	Perfil de clorofila <i>a</i> expresada en mg/m ³ , tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en mayo del 2014.	134
47	Perfil de productividad primaria bruta, productividad primaria neta y respiración expresada en mg C/m ³ d, tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en mayo del 2014.	134
48	Perfil de clorofila <i>a</i> expresada en mg/m ³ , tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en julio del 2014.	135
49	Perfil de productividad primaria bruta, productividad primaria neta y respiración expresada en mg C/m ³ d, tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en julio del 2014.	135
50	Perfil de clorofila <i>a</i> expresada en mg/m ³ , tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en septiembre del 2014.	136
51	Perfil de productividad primaria bruta, productividad primaria neta y respiración expresada en mg C/m ³ d, tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en septiembre del 2014.	136

52	Perfil de clorofila <i>a</i> expresada en mg/m ³ , tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en noviembre del 2014.	137
53	Perfil de productividad primaria bruta, productividad primaria neta y respiración expresada en mg C/m ³ d, tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en noviembre del 2014.	137
54	Perfil de clorofila <i>a</i> expresada en mg/m ³ , tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en enero del 2015.	138
55	Perfil de productividad primaria bruta, productividad primaria neta y respiración expresada en mg C/m ³ d, tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en enero del 2015.	138

ÍNDICE DE CUADROS

No.	Título	Página
1	Porcentaje de industrias evaluadas por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN), y la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), durante los años del 2007 al 2009, según su distribución en los municipios que se ubican en la cuenca del lago de Amatitlán.	10
2	Valores de cumplimiento de los límites máximos permisibles establecidos en el acuerdo gubernativo número 236-2006 para el año 2011, en parámetros generales.	11
3	Población y cobertura de la infraestructura de saneamiento, según municipios ubicados en la cuenca del lago de Amatitlán.	12
4	Rangos para definir el estado trófico de un cuerpo de agua léntico a partir de mediciones de transparencia.	19
5	Promedios anuales de transparencia medidos en metros, durante los años 2009 al 2013, en los sitios de muestreo ubicados en centro este y centro oeste del lago de Amatitlán.	20
6	Promedios anuales de temperatura medida en grados Celsius (°C), durante los años 2009 al 2013, tomados a nivel superficial en los sitios de muestreo ubicados en el centro este y centro oeste del lago de Amatitlán.	27
7	Promedios anuales de potencial de hidrógeno (pH), durante los años 2009 al 2013, tomados a nivel superficial en los sitios de muestreo ubicados en el centro este y centro oeste del lago de Amatitlán.	32
8	Calidad del agua en función del porcentaje de saturación de oxígeno.	36
9	Promedios anuales del porcentaje de saturación de oxígeno, durante los años 2009 al 2013, tomados a nivel superficial en los sitios de muestreo ubicados en el centro este y centro oeste del lago de Amatitlán.	41
10	Presencia de cianofíceas fijadoras de nitrógeno durante los años 2010 al 2013, recolectadas a nivel superficial en sitios de muestreo ubicados en el centro este y centro oeste del lago de Amatitlán.	43
11	Clasificación de lagos de acuerdo al contenido de Nitrógeno total, según diferentes autores.	44
12	Clasificación de lagos europeos de acuerdo con el contenido de nitrógeno en sus tres formas.	45

13	Promedios anuales de las concentraciones de nitrógeno total medidos en mg/L durante los años 2009 al 2012, en los sitios de muestreo ubicados en el centro este y centro oeste del lago de Amatitlán.	49
14	Promedios anuales de las concentraciones de nitrógeno de amonio medidos en mg/L durante los años 2009 al 2012, en los sitios de muestreo ubicados en el centro este y centro oeste del lago de Amatitlán.	50
15	Promedios anuales de las concentraciones de nitrógeno de nitrito medidos en mg/L durante los años 2009 al 2012, en los sitios de muestreo ubicados en el centro este y centro oeste del lago de Amatitlán.	51
16	Relaciones generales entre la productividad de los lagos y las concentraciones medias de fósforo epilimnético total.	53
17	Promedios anuales de las concentraciones de fósforo de ortofosfatos medidos en mg/L durante los años 2009 al 2012, en los sitios de muestreo ubicados en el centro este y centro oeste del lago de Amatitlán.	55
18	Estado trófico y productividad primaria fitoplanctónica en mg C/m ² d.	58
19	Clasificación de lagos de la Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), de acuerdo al contenido de clorofila <i>a</i> .	62
20	Clorofila <i>a</i> y feofitina expresada en mg/m ³ , productividad primaria bruta (PPB), respiración (R), y productividad primaria neta (PPN), expresadas en mg C/m ³ h; medidas realizadas a diferentes profundidades indicadas por la medición de transparencia por medio de un Disco Secchi (DS), en los sitios de muestreo ubicados en el centro este y centro oeste del lago de Amatitlán; durante marzo del 2014 a enero del 2015. Se presenta una columna que contiene los valores promediados de las muestras de clorofila <i>a</i> , tomadas por duplicado a diferentes profundidades (X), así como su respectiva desviación estándar (SD).	78
21	Transparencia medida en metros por medio de disco Secchi, clorofila <i>a</i> expresada en mg/m ² , productividad primaria bruta (PPB), respiración (R), productividad primaria neta (PPN), expresadas en mg C/m ² d y el coeficiente de asimilación de carbono (PPN/B) expresado en mg C/mg clorofila- <i>a</i> *d; medidas realizadas en los sitios de muestreo ubicados en el centro este y centro oeste del lago de Amatitlán; durante marzo del 2014 a enero del 2015.	85

22	Lecturas de absorción a 665nm, 750nm, y a 665 y 750nm en condiciones ácidas, medidas en un espectrofotómetro para la estimación de clorofila <i>a</i> y feofitina. Realizadas a diferentes profundidades indicadas por la medición de transparencia por medio de un Disco Secchi (DS), en los sitios de muestreo ubicados en el centro este y centro oeste del lago de Amatitlán durante marzo del 2014 a enero del 2015. Se presenta una columna que contiene los valores promediados (X), de las lecturas de absorción a 665nm, 750nm, y a 665 y 750nm en condiciones ácidas tomadas por duplicado, así como su respectiva desviación estándar (SD).	104
23	Volumen de tiosulfato de sodio (Na ₂ S ₂ O ₃), expresado en ml, gastado en las titulaciones para la estimación de oxígeno disuelto por el método de Winkler; medidas realizadas a diferentes profundidades indicadas por la medición de transparencia por medio de un Disco Secchi (DS), en los sitios de muestreo ubicados en el centro este y centro oeste del lago de Amatitlán, durante marzo del 2014 a enero del 2015. Se presenta una columna que contiene los valores promediados (X), de los volúmenes de tiosulfato de sodio (Na ₂ S ₂ O ₃), gastado en las titulaciones, tomado por duplicado a diferentes profundidades, así como su respectiva desviación estándar (SD).	109
24	Radiación solar expresada en W/m ² , registrada de forma horaria de los días en los que fueron realizadas las mediciones en campo.	121
25	Tiempo de incubación de muestras de fitoplancton expresado en horas, tomados en los sitios de muestreo ubicados en el centro este y centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en marzo del 2014 a enero del 2015.	122

I. RESUMEN

En la presente investigación se buscó establecer el estado trófico del lago de Amatitlán a través de los parámetros de productividad primaria y biomasa. La investigación permitió describir las diferencias de productividad primaria y biomasa entre el sector sureste y noroeste de lago de Amatitlán, así como la evolución de dichos parámetros entre la época seca y lluviosa.

La estimación de la productividad primaria se realizó a través del método de evolución de la concentración de oxígeno en botellas claras y oscuras (Wetzel y Likens, 2000). El contenido de oxígeno disuelto inicial y final fue determinado a través del método de Winkler. La biomasa fue determinada indirectamente a través de la medición de clorofila *a*, según el método de Nusch y Palme, 1975.

En la parte más estrecha del lago de Amatitlán se construyó un dique que se conoce como El Relleno, y separa el lago en dos segmentos, uno que se ubica al sureste y otro al noroeste. Cada uno de los segmentos se comporta de forma diferente, en la investigación fueron tomados en cuenta el centro del segmento sureste y el noroeste. El experimento se realizó en dos variantes estacionales, época seca y lluviosa, se llevaron a cabo tres muestreos en época seca y tres muestreos en época lluviosa, los muestreos fueron realizados de marzo del 2014 a enero del 2015.

Los resultados de transparencia, biomasa y productividad primaria reflejaron que el lago de Amatitlán es un cuerpo de agua hipereutrófico, lo cual coincide con registros históricos de parámetros físicos y químicos recabados por la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA) y otros autores. La capacidad del lago de Amatitlán para asimilar el carbono inorgánico en forma de biomasa a través del fitoplancton es limitada, ya que gran parte del carbono inorgánico incorporado a la biomasa por el fitoplancton regresa a la atmósfera debido a los procesos de respiración.

En el centro este la productividad primaria bruta varió de 375.1 a 11,603.4 mg C/m²d, la productividad primaria neta de 253.2 a 4,534.8 mg C/m²d, y la biomasa de fitoplancton (estimada con la concentración de clorofila a) varió de 72.5 a 257.71 mg/m². El centro oeste presento valores de productividad primaria bruta que variaron de 661.0 a 6,488.2 mg C/m²d, de productividad primaria neta de 250.0 a 2,667.5 mg C/m²d, y la biomasa de fitoplancton (estimada con la concentración de clorofila a) varió de 63.25 a 552.26 mg/m². El centro este del lago de Amatitlán presenta un promedio anual de productividad primaria bruta y productividad primaria neta mayor al centro oeste del lago. El centro oeste del lago de Amatitlán presenta concentraciones más altas de biomasa de fitoplancton. Se observó que los valores más altos de productividad primaria en el lago de Amatitlán fueron registrados entre los meses de marzo a septiembre del 2014.

II. INTRODUCCIÓN

El lago de Amatitlán se ubica al sur del valle de la Ermita aproximadamente a 25 km de la ciudad capital de Guatemala a una altitud de 1,186 metros sobre el nivel del mar (msnm), tiene un área de 15.2 Km² y una profundidad máxima de 33 metros. La cuenca del lago de Amatitlán está formada por 14 municipios de los departamentos de Guatemala y Sacatepéquez (AMSA, 2013, pp. 2).

El crecimiento acelerado de las áreas urbanas e industriales de la ciudad de Guatemala y las cabeceras municipales de Mixco, Villa Nueva, San Miguel Petapa, Villa Canales, Amatitlán y Santa Catarina Pinula, han ejercido un impacto negativo sobre el lago de Amatitlán y su cuenca. Existe un reglamento para la descarga y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos, sin embargo la falta de controles sobre los vertidos de tipo industrial, descargas de aguas municipales de origen doméstico, deficiente manejo de residuos sólidos, explotación del suelo y erosión; han enriquecido el cuerpo de agua con numerosos contaminantes, nutrientes y materia orgánica. Esto ha incidido en el deterioro de la calidad de agua del lago de Amatitlán, con consecuencias en la composición química del lago y proliferación de microalgas y cianobacterias (AMSA, 2012, pp. 28).

La productividad primaria es una medida que indica la tasa de incorporación de carbono inorgánico durante la fotosíntesis por parte de fitoplancton, nos permite evaluar el estado trófico del cuerpo de agua (Wetzel, R, 1981, pp. 289). El fenómeno de eutrofización está asociado a un aumento en la productividad primaria del cuerpo de agua. La biomasa brinda una estimación de la cantidad relativa del total de materia viva de una especie determinada, (Roldán & Ramírez, 2008, pp. 275), en este caso el fitoplancton. La determinación de la biomasa es relevante para que el análisis del cuerpo de agua sea más completo. Los lagos pueden clasificarse en base a su nivel de producción primaria en oligotróficos, mesotróficos, eutróficos e hipereutróficos, de acuerdo a la baja o alta productividad (Wetzel, R, 1981, pp. 288).

Por medio de la presente investigación se estableció el estado trófico del lago de Amatitlán a través de la estimación de biomasa y productividad primaria. La determinación de biomasa se realizó a través de la cuantificación de la clorofila *a*. La estimación de la productividad primaria por el método de evolución de oxígeno disuelto en botellas claras y oscuras; la diferencia entre la concentración inicial de oxígeno y la concentración final de oxígeno en las botellas claras indican la actividad fotosintética bruta, en su lugar la diferencia entre la concentración inicial de oxígeno y la concentración final de oxígeno en las botellas oscuras indica la actividad de la respiración. Se realizaron seis mediciones, tres en época seca y tres en época lluviosa. Se tomaron en cuenta los puntos “Centro Este” (coordenadas N14°26'08.1" W090°33'05.5"), y “Centro Oeste” (coordenadas N14°28'38.1" W090°35'13.4"), del lago de Amatitlán, en adelante estos puntos se referirán únicamente como centro este y centro oeste. El lago de Amatitlán consiste en dos segmentos de agua conectados por un dique que recibe el nombre de El Relleno, ver figura 2, se eligieron los puntos de muestreo tomando en cuenta las diferencias entre cada uno de los segmentos. También se buscó contar con el registro histórico de los parámetros fisicoquímicos medidos en el área por la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA), y por las facilidades para realizar los perfiles para la estimación de la productividad primaria y biomasa, así como otras mediciones de campo conferidas por las boyas de anclaje ubicadas en ambos puntos por dicha institución.

Los resultados de transparencia, biomasa y productividad primaria reflejaron que el lago de Amatitlán es un cuerpo de agua hipereutrófico, y que su capacidad para asimilar el carbono inorgánico en forma de biomasa a través del fitoplancton es limitada.

III. ANTECEDENTES

A. Descripción del cuerpo de agua

1. La cuenca del río María Linda y la subcuenca del lago de Amatitlán

La cuenca del río María Linda está conformada por 27 municipios de los departamentos de Guatemala, Sacatepéquez, Santa Rosa y Escuintla. Tiene un área aproximada de 2,780 Km² siendo la cuenca más extensa de la vertiente del Pacífico, su caudal promedio anual es de 50.23 m³/s. Dentro de la cuenca del río María Linda se encuentra la subcuenca del lago de Amatitlán, también pueden ubicarse las lagunas de Calderas y El Pino, además de lagunas de menor tamaño que se encuentran cercanas a la zona de inundación. La cuenca del río María Linda cuenta con dos brazos principales que son el río Michatoya y el río Aguacapa, que al unirse conforman el río María Linda, ver figura 1. El río Michatoya sirve como afluente del río María Linda, y transporta el exceso hídrico ecológico del lago de Amatitlán (AMSA, 2012, pp. 116).

La cuenca de lago de Amatitlán está formada por 14 municipios de los departamentos de Guatemala y Sacatepéquez, (Guatemala, Amatitlán, Villa Nueva, Villa Canales, San Miguel Petapa, Santa Catarina Pinula, Mixco, Fraijanes, San Lucas Sacatepéquez, Santiago Sacatepéquez, San Pedro Sacatepéquez, Magdalena Milpas Altas, Santa Lucía Milpas Altas y San Bartolomé Milpas Altas). De los municipios de la cuenca, siete tienen influencia directa en el lago de Amatitlán, Villa Nueva, Villa Canales, San Miguel Petapa, Santa Catarina Pinula, Mixco, Amatitlán y Guatemala; debido al impacto producido por la degradación de los recursos naturales, crecimiento poblacional, eliminación de la cobertura boscosa, explotación del suelo y crecimiento industrial (AMSA, 2013, pp. 5).

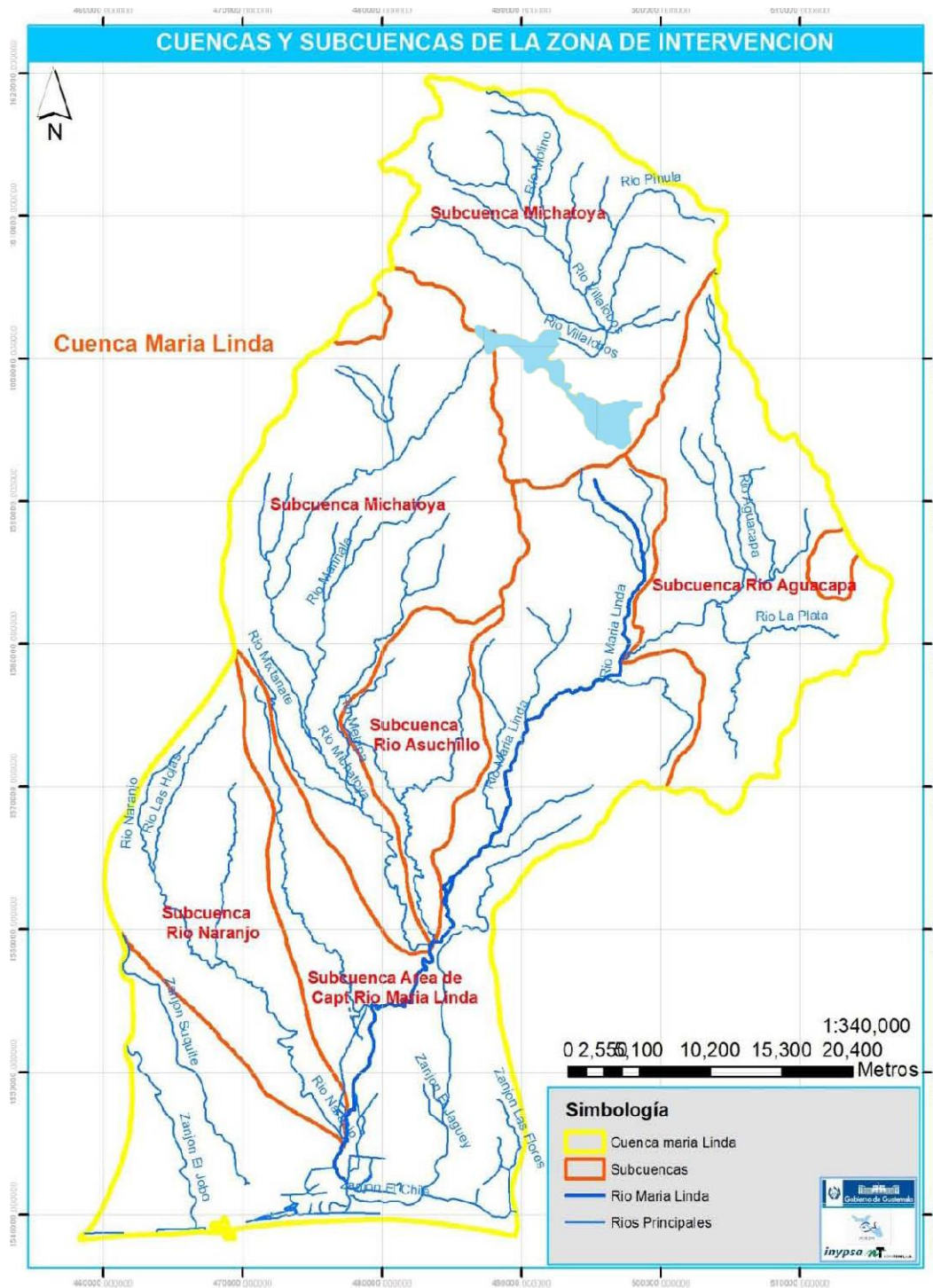


Figura 1: La cuenca y subcuencas del río Maria Linda (Fuente: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA) (2012). *Actualización del Plan de Manejo Integrado de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (PLANDEAMAT)*. Guatemala: Presidencia de la República).

La cuenca del lago de Amatitlán está conformada por varias microcuencas cuyas aguas convergen en el río Villalobos, afluente principal del lago de Amatitlán. Los ríos tributarios de la cuenca del lago de Amatitlán suman 289 Km lineales, siendo los principales: Pínula, Guadrón, Pansalic, Panchiguajá, Platanitos, Pampumay, San Lucas, Molino, Tulujá, Las Minas, Río Blanco, El Bosque, Parrameño, Villalobos, Frutal (quebrada) y Zacatal (zanjón). En el lado noroeste del lago de Amatitlán drena el río Villalobos principal río de la cuenca. La cuenca del río Villalobos tiene una extensión de 61.76 Km² y una longitud de 22 Km, el caudal máximo que se ha medido en el río Villalobos es de 45 m³/seg y el mínimo de 0.75 m³/seg. Hacia el lado sureste del lago de Amatitlán, drenan, directamente, los ríos Pampumay, Chinquín (AMSA, 2012, pp. 120).

2. Lago de Amatitlán

El lago de Amatitlán es uno de los recursos naturales más importantes del sistema hidrológico de Guatemala, es el cuarto cuerpo de agua más grande del país. Está localizado al sur del valle de la Ermita, sus coordenadas corresponden a 14°42'-14°22'75" latitud norte y 90°42'-90°16'86" longitud oeste del meridiano Greenwich. Se ubica a una altura de 1,186 msnm y tiene un área de 15.2 Km² (Pérez, D, 2007, pp. 4). En el año 2007 presentaba una profundidad máxima de 33 metros y una profundidad media de 18 metros, su nivel del agua era irregular y fluctuaba en un rango de 1.5 a 2.3 metros (Pérez, D, 2007, pp. 4).

El lago de Amatitlán tiene un origen volcánico-tectónico, producido en el último millón de años, su forma irregular se debe al colapso de las paredes durante las diferentes erupciones del complejo volcánico. El clima está marcado por dos estaciones: época seca, que comprende los meses de noviembre a abril y la época lluviosa entre los meses de mayo a octubre (Pérez, D, 2007, pp. 6).

El lago de Amatitlán está formado por dos segmentos de agua conectados por un dique que fue construido para el paso del ferrocarril, que recibe el nombre de El Relleno, ver figura 2. Esto separó el lago en dos cuerpos de agua con diferentes características físicas, químicas y biológicas. La parte noroeste, en donde se ubica la playa pública del lago de Amatitlán, recibe toda la contaminación que proviene de la región sur de la capital y de la cuenca del río Villalobos. El agua de la misma porción del lago es drenada al Río Michatoya y se usa para generar energía eléctrica en la planta Jurún Marinalá. Este uso del lago implica mayores tiempos de retención y por consiguiente mayor sedimentación (Pérez, D, 2007, pp. 5).

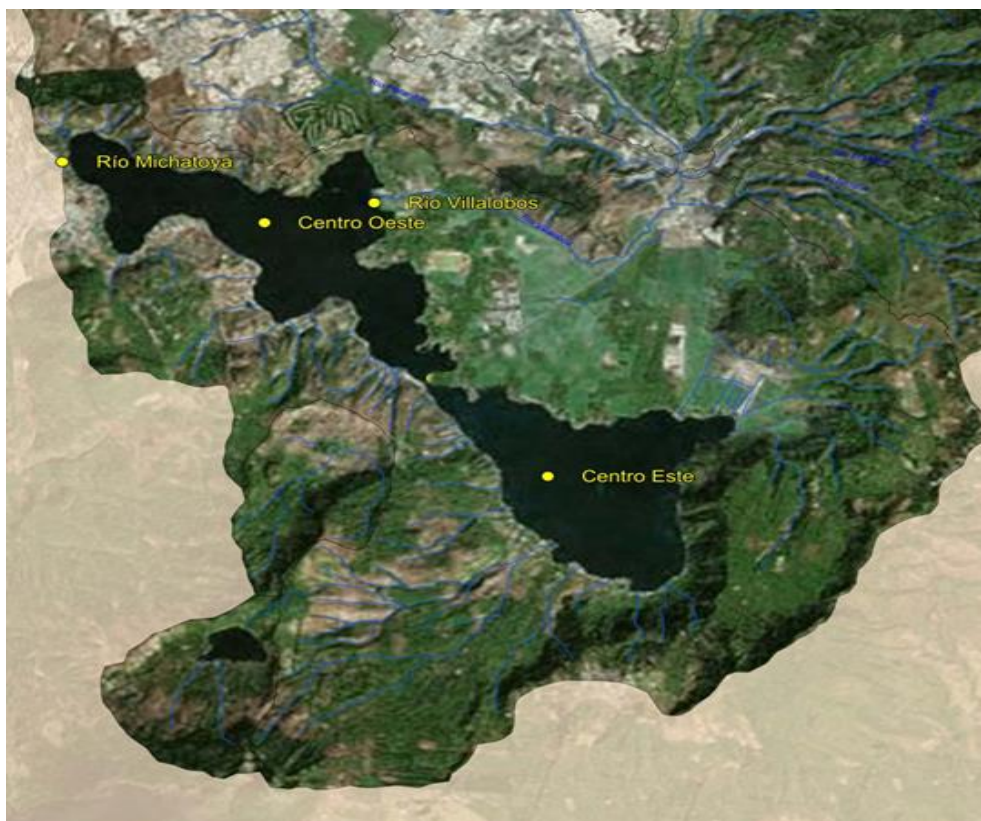


Figura 2: Relieve lago de Amatitlán (Fuente: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA) e Ingeniería del Agua (INCLAM). (2014). *Plan de Control de la Contaminación del lago de Amatitlán y del río Villalobos*. Guatemala)

B. Problemas de contaminación en la cuenca y el lago de Amatitlán

1. Escasos controles en la producción industrial

Según datos recabados por el Instituto Nacional de Estadística (INE) en 1996, Guatemala cuenta con más de 3,193 industrias; de las cuales 900 se encuentran ubicadas en la cuenca del lago de Amatitlán. Se dedican a diferentes áreas industriales como: textiles, alimenticias, metalúrgicas, galvanoplásticas, químicas, agroquímicas, curtiembres, jabones y cosméticos, yeso y cerámica entre otras. Se distribuyen principalmente en las zonas 11 y 12 de la ciudad capital y en el municipio de Villa Nueva. Muchas industrias no vierten sus aguas residuales de forma continua, si no únicamente en determinadas horas del día o incluso únicamente en determinadas épocas de año, dependiendo del tipo de producción y del proceso industrial. También son habituales las variaciones de caudal y carga a lo largo del día (AMSA, 2012, pp. 283).

En los años del 2007 al 2009 el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales y la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA); llevaron a cabo un estudio en donde se evaluaron 400 industrias de siete municipios del departamento de Guatemala, pertenecientes a la cuenca del lago de Amatitlán. El objetivo del estudio fue evaluar el cumplimiento de las industrias respecto al acuerdo gubernativo número 236-2006 del Reglamento de Descargas y Re-uso de Aguas Residuales y Disposición de Lodos, de la legislación de Guatemala (AMSA, 2012, pp. 284). Según los resultados de este estudio los municipios que presentaron mayor número de industrias fueron Guatemala, Mixco y Villa Nueva, ver cuadro 1.

Cuadro 1: Porcentaje de industrias evaluadas por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN), y la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), durante los años del 2007 al 2009, según su distribución en los municipios que se ubican en la cuenca del lago de Amatitlán

Municipio	Total de industrias	Porcentaje %
Amatitlán	11	3
Guatemala	233	58
Mixco	65	16
San Miguel Petapa	12	4
Santa Catarina Pinula	4	1
Villa Canales	6	2
Villa Nueva	69	17
Total	400	100

Fuente: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán -AMSA (2012). *Actualización de Plan de Manejo Integrado de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (PLANDEAMAT)*. Guatemala: Presidencia de la República.

En el cuadro número 2 puede observarse que un gran número de industrias cumple con los valores límite máximos permisibles para el año 2011 de nitrógeno total y fósforo total. Según el mismo cuadro un porcentaje importante de industrias cumplió con los valores límite máximos permisibles para el año 2011 de pH y sólidos suspendidos. Un porcentaje bajo de industrias cumplió con los valores límite máximos permisibles para el año 2011 de aceites y grasas, y coliformes fecales, pueden observarse los detalles en el cuadro 2 (AMSA, 2012, pp. 285).

Cuadro 2: Valores de cumplimiento de los límites máximos permisibles establecidos en el acuerdo gubernativo número 236-2006 para el año 2011, en parámetros generales

	pH 6-9	Sólidos suspendidos 1500-600mg/L	Aceites y grasas 200-100mg/L	Coliformes Fecales 1x10 ⁶ NMP ¹	Nitrógeno Total 180-100 mg/L	Fósforo Total 75-100 mg/L
Total de industrias que cumplen	313	354	155	46	363	361
Total de industrias monitoreadas	399	396	315	217	373	369
Porcentaje de industrias que cumplen	78.4	89.4	49.2	21.2	97.3	97.8

Fuente: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán -AMSA (2012). *Actualización del Plan de Manejo Integrado de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (PLANDEAMAT)*. Guatemala: Presidencia de la República. Nota: ¹ Número más probable.

En el 2011 los valores límite máximos permisibles del acuerdo 236-2006 del Reglamento de Descargas, Re-uso de Aguas Residuales y Disposición de Lodos; se encontraban en la primera fase de un modelo de reducción progresiva que entró en vigencia en mayo del 2011, la segunda fase entraba en vigencia en mayo del 2015, pero se autorizó una prórroga para darle un efectivo cumplimiento hasta el 5 de mayo del 2019. Se espera que las industrias se acomoden a las nuevas disposiciones del reglamento a fin de que se respondan a las necesidades reales de la cuenca y del lago de Amatitlán (AMSA, 2012, pp. 285).

2. Vertido de residuos líquidos

El crecimiento acelerado de las áreas urbana e industrial de la Ciudad de Guatemala y las cabeceras municipales de Mixco, Villa Nueva, San Miguel Petapa, Villa Canales, Santa Catarina Pinula y Amatitlán, provocó que las aguas residuales empezaran a drenarse a los ríos y corrientes que drenan hacia la vertiente del Pacífico, produciendo contaminación en la cuenca del río Villalobos y del lago de Amatitlán (AMSA, 2012, pp. 287). Municipios con poblaciones de un gran número de habitantes como Guatemala, Mixco, Villa Canales y Amatitlán, cuentan con escasas plantas de tratamiento de aguas residuales; otros municipios como San Miguel Petapa y Santa Catarina Pinula no cuentan con ninguna, ver cuadro 3.

Cuadro 3: Población y cobertura de la infraestructura de saneamiento, según municipios ubicados en la cuenca del lago de Amatitlán

Municipio	Población estimada	Total de viviendas	Porcentaje de viviendas con servicio de saneamiento básico	Total de plantas de tratamiento de aguas residuales
Guatemala (parte sur de la ciudad capital, zona 11, 12, 13 y 21)	1,022,000	221,969	97%	5
Mixco	452,134	92,426	98%	5

Fuente: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán -AMSA (2012). *Actualización del Plan de Manejo Integrado de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (PLANDEAMAT)*. Guatemala: Presidencia de la República.

Cuadro 3: Población y cobertura de la infraestructura de saneamiento, según municipios ubicados en la cuenca del lago de Amatitlán

Municipio	Población estimada	Total de viviendas	Porcentaje de viviendas con servicio de saneamiento básico	Total de plantas de tratamiento de aguas residuales
Villa Nueva	539,909	73,166	96%	46
San Miguel Petapa	124,898	26,721	82%	0
Villa Canales	685,000	22,327	97%	2
Santa Catarina Pinula	63,767	13,623	61%	0
Amatitlán	125,000	16,995	80%	3

Fuente: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán -AMSA (2012). *Actualización del Plan de Manejo Integrado de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (PLANDEAMAT)*. Guatemala: Presidencia de la República.

En el año 2014 se identificaron 381 puntos de vertido de aguas residuales de origen doméstico e industrial en la cuenca del río Villalobos, algunos de los cuales corresponden a agrupaciones. Casi el 40% de estos puntos de vertido se concentran en las cuencas de los ríos Pínula y Platanitos (AMSA e INCLAM, 2014, pp. 39).

Las aguas residuales domésticas constituyen un 86% de las aguas superficiales que ingresan al lago, y las aguas de origen industrial constituyen un 14%, estas son vertidas inicialmente a los barrancos, ríos, riachuelos y al suelo, en su mayoría sin algún tratamiento, teniendo como consecuencia la contaminación de las aguas subterráneas y superficiales (AMSA, 2012, pp. 287).

La descarga de aguas residuales se traduce en tres impactos considerables (AMSA, 2012, pp. 288):

- La acumulación de compuestos tóxicos a través de contaminación química. Este tipo de contaminación incorpora sustancias exógenas a la naturaleza química de un lago, lo que provoca la perturbación del ecosistema. Los principales contaminantes químicos lo constituyen nutrientes como Nitrógeno, Fósforo.
- La proliferación de agentes patógenos para el hombre y otras especies, como: virus, bacterias, hongos y parásitos que podrían ocasionar infecciones intestinales en la población que consume el agua del Lago.
- La eutrofización de sus aguas. Es el proceso por el cual se llega a un estado bio-físico-químico resultante del aumento de Nitrógeno y Fósforo en un cuerpo de agua. Esto trae como consecuencia una tensión o alteración al equilibrio propio de los ciclos de estos elementos en el ecosistema. El Nitrógeno y Fósforo se encuentran presentes en la orina humana, aguas jabonosas y fertilizantes químicos.

Estos factores han provocado un aumento en la cantidad de fitoplancton, una disminución alarmante en las concentraciones de oxígeno disuelto; teniendo como consecuencia la degradación del lago con repercusiones negativas en el ecosistema (AMSA, 2012, pp. 289).

3. Manejo deficiente de residuos sólidos

Debido a la concentración poblacional en la cuenca del lago de Amatitlán, los residuos sólidos o basura constituyen uno de los problemas más graves de contaminación y deterioro ambiental dentro del área. La mala disposición de los residuos y botaderos clandestinos crean un medio ideal para la reproducción de bacterias y el hábitat para roedores, moscas, entre otros. Según datos de la municipalidad de Guatemala, en el año 2010 se estimó que existían 490 botaderos clandestinos en la ciudad capital (AMSA, 2012, pp. 286). El río Villalobos arrastra una gran cantidad de residuos sólidos hasta el lago de Amatitlán, lo que ocasiona problemas de gran magnitud. Según datos de la División de Manejo de Desechos Sólidos de la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA), se estima que en un año llegan al lago de Amatitlán, aproximadamente 75 mil toneladas de basura proveniente de los barrancos, zanjones, cunetas y sitios baldíos; siendo depositada en esos lugares por los habitantes del área. Esta basura es de procedencia doméstica, compuesta por materia orgánica, así como materiales inorgánicos (AMSA, 2012, pp. 286).

4. Uso inadecuado del suelo

Debido a la demanda de vivienda el uso del suelo se ha modificado en forma constante, pasando de áreas de uso agrícola y forestal a áreas urbanas. Con el crecimiento poblacional se generó mayor actividad de intercambio, gestión y consumo, lo que dio origen a un proceso de instalación industrial en la parte sur de la ciudad, generándose la mayor concentración de industria en jurisdicción de los municipios de Villa Nueva, San Miguel Petapa, Mixco y Amatitlán (AMSA, 2012, pp. 292). En la cuenca del lago de Amatitlán predomina el área urbana e industrial con 228.78 Km² que corresponde al 60% del área de la cuenca. El área agrícola ocupa 83.88 Km² equivalente al 22%, el área destinada a pastos naturales es de 38.13 Km² que constituye el 10%, al área de bosque le corresponden 15.25 Km² lo que representa el 4%, y el lago de Amatitlán ocupa el 4%. Por lo que las áreas de recarga de acuíferos constituyen un 36%, y son las áreas agrícolas, de bosque y pastos naturales. Debido al crecimiento poblacional, la instalación industrial sobre la

cuenca, la actividad agrícola con uso de agroquímicos como pesticidas y fertilizantes, las descargas de aguas negras sin tratamiento y la deforestación, entre otros, se ha generado una carga de contaminación a los cuerpos de agua, tanto superficiales como subterráneos, siendo el lago de Amatitlán su punto de concentración, sobrepasando su capacidad de amortiguamiento (AMSA, 2012, pp. 292).

5. Erosión y desestabilización de los ríos de la cuenca del lago de Amatitlán:

La deforestación en las cabeceras de cuenca y en las riberas de ríos, la explotación descontrolada de materiales para la construcción, el crecimiento urbano desordenado y no planificado han provocado un desequilibrio ecológico que ha incidido en el deterioro de los ríos de la cuenca y por tanto del lago de Amatitlán. Los ríos San Lucas, El Molino, El Frutal, Platanitos, Pinula y Las Minas se ven diariamente explotados por empresas que se dedican a la comercialización de materiales de construcción como arena y pedrín. Esta actividad ha venido a alterar la pendiente de dichos ríos, provocando la formación de cárcavas en época lluviosa y alterando el cauce en el río Villalobos hasta en cuatro metros de profundidad. La parte alta de la cuenca ya no posee mayor vegetación, por lo que en época de lluvia hay escorrentía, debido a la explotación de materiales para la construcción en la parte baja de la cuenca grandes cantidades de sedimentos son arrastrados hacia el lago por la corriente de agua. Estos sedimentos son depositados en las zonas bajas y planas de los ríos incrementado su altura en el lecho del río y derramando el agua por los laterales, ver figura 3. Dichos desbordamientos han provocado inundaciones, principalmente en los centros poblados que se ubican en las márgenes de éstos (AMSA, 2012, pp. 293).



Figura 3: Platanitos Cuenca Alta, fotos tomadas en Enero 2014 (Izquierda) y Junio 2014 (Derecha). (Fuente: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA) e Ingeniería del Agua (INCLAM). (2014). *Plan de Control de la Contaminación del lago de Amatitlán y del río Villalobos*. Guatemala)

En el área se producen erosiones de tipo laminar, de surcos, y formaciones de cárcavas, con grados desde ligeros a moderados y fuertes, ver figura 4. La mayor susceptibilidad a la erosión laminar la presenta la microcuenca del río Villalobos, seguida por las microcuencas de los ríos Pinula, Las Minas, El Molino y Platanitos, indicando un proceso erosivo que puede ser leve, aunque debe notarse, sin embargo, que las áreas de las microcuencas de los ríos Villalobos y Pinula están ocupadas por área urbana. La erosión de surcos es más destructiva que la laminar, la mayor susceptibilidad a esta forma la presenta la microcuenca de los ríos El Bosque, Parrameño, Tuluja y la microcuenca de Amatitlán (AMSA, 2012, pp. 293).

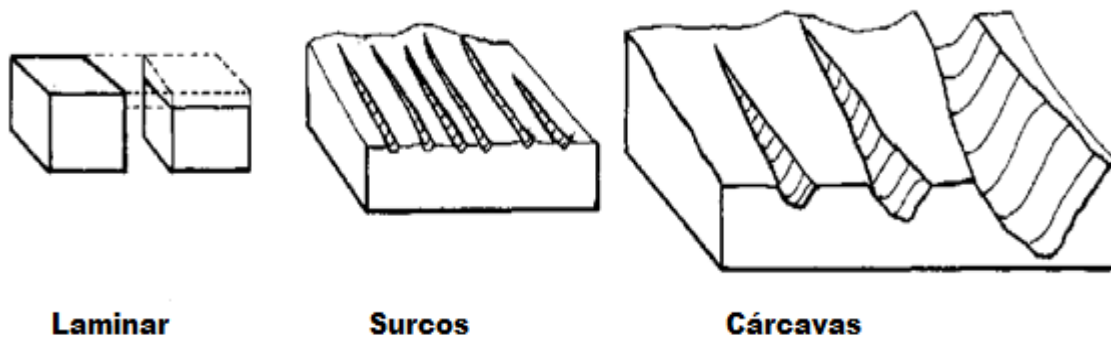


Figura 4: Tipos de erosión del suelo. (Fuente: Crosara, A. (2007). *Erosión*. Uruguay. Universidad de la República de Uruguay).

Según los resultados de la batimetría realizada en el año 2012, el río Villalobos acarrea 1,6 millones de toneladas de sedimentos al año, se estimó una tasa de sedimentación de 0.21m/año. Según datos recopilados en este estudio el lado sureste no ha sido impactado, debido a que la gran mayoría de sedimentos que transporta el río Villalobos ingresa solamente por el lado noroeste. En contraste el lado noroeste ha sido impactado severamente por los eventos extremos de los últimos años, en los cuales el río Villalobos ha transportado una gran cantidad de material. La expectativa de vida para el lago de Amatitlán se calcula en 220 años a partir del 2012, se estima que el lado noroeste será el primero en azolvarse en un periodo de alrededor de 110 años a partir del 2010 (WESA-ASEBASTE, 2012, pp.19, 22, 33).

El efecto del azolvamiento del lago de Amatitlán incide drásticamente en la alteración del ciclo del agua, en la pérdida de flora y fauna y en el agotamiento de las aguas subterráneas por la reducción de infiltración, así como altos niveles de erosión, entre otros (AMSA, 2012, pp. 293).

C. Propiedades fisicoquímicas en sistemas acuáticos

1. Transparencia:

La transparencia es una medida de gran valor en limnología, que permite evaluar la extinción vertical y las características espectrales de luz en los lagos. La transparencia se mide en el lugar de muestreo a través del disco Secchi; que corresponde a la profundidad media entre el punto en el cual un disco horizontal de 20cm de diámetro con cuadrantes blancos y negros, desaparece al ser observado a la sombra de una embarcación y el punto en el cuál vuelve a ser visto al elevarlo, después de haber sido hundido por debajo del nivel de visibilidad (Wetzel, R, 1981, pp. 56).

La profundidad de la transparencia es bastante independiente de la intensidad de la luz en la superficie, pero se vuelve muy errática en el amanecer y el crepúsculo. En lagos templados las horas más adecuadas para realizar estas observaciones son

entre 10.00am a 2.00pm. Las transparencias observadas mediante el disco Secchi oscilan desde unos pocos centímetros, hasta 40m en algunos lagos de aguas muy claras. Los lagos oligotróficos poseen por lo general transparencias altas (Wetzel, R, 1981, pp. 56).

En el trópico, lagos de alta montaña de origen volcánico o glaciario presentan transparencias de hasta 15m. En su lugar embalses y ciénagas tropicales, sometidos por lo regular a altas precipitaciones, arrastre de sedimentos, de alta productividad, presentan transparencias de pocos centímetros hasta dos o tres metros. Lagos con características de eutrofia presentan una transparencia menor a 0.80m, ver cuadro 4. (Roldán & Ramírez, 2008, pp. 152).

Cuadro 4: Rangos para definir el estado trófico de un cuerpo de agua léntico a partir de mediciones de transparencia.

Transparencia en metros (Disco Secchi)	Estado trófico
≥ 1.60	Oligotrófico
Entre 0.81 y 1.59	Mesotrófico
≤ 0.80	Eutrófico

Fuente: Roldán, G; Ramírez, J. (2008). *Fundamentos de limnología neotropical*. Colombia. Universidad de Antioquia. pp. 155

a) Transparencia en el lago de Amatitlán:

Como puede observarse en el cuadro 5 los promedios de transparencia de los años 2009 al 2013, son mayores en la época lluviosa en relación a los de la época seca para el centro este, tendencia que se ve invertida en el centro oeste donde los promedios de transparencia son mayores en época seca que en la época lluviosa. En los años 2009, 2010 y 2011 el centro este presentó promedios de transparencia mayores a los que le corresponden al centro oeste, pero en los años más recientes 2012 y 2013 esta tendencia se ve invertida.

Cuadro 5: Promedios anuales de transparencia medidos en metros, durante los años 2009 al 2013, en los sitios de muestreo ubicados en centro este y centro oeste del lago de Amatitlán.

Año	Centro Este (m)			Centro Oeste (m)		
	Promedio época seca	Promedio época lluviosa	Promedio anual	Promedio época seca	Promedio época lluviosa	Promedio anual
2009	1.0	1.2	1.1	1.4	0.7	1.0
2010	0.7	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7
2011	1.1	1.2	1.2	1.2	0.5	0.8
2012	0.9	0.8	0.8	1.3	0.8	1.0
2013	0.6	0.7	0.6	0.9	0.7	0.8

Fuente: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA). Datos de la División de control, calidad ambiental y manejo de lagos.

Como se puede observar en la figura 5, los promedios de transparencia del año 2013 para el centro este, no sobrepasan los 0.80m, salvo para los meses de marzo, julio, agosto y noviembre. Como se puede observar en la figura 6 los promedios de transparencia del año 2013 para el centro oeste, tampoco sobrepasan los 0.80m, a excepción de los meses de marzo, abril, mayo y noviembre (AMSA, 2013, pp. 8).

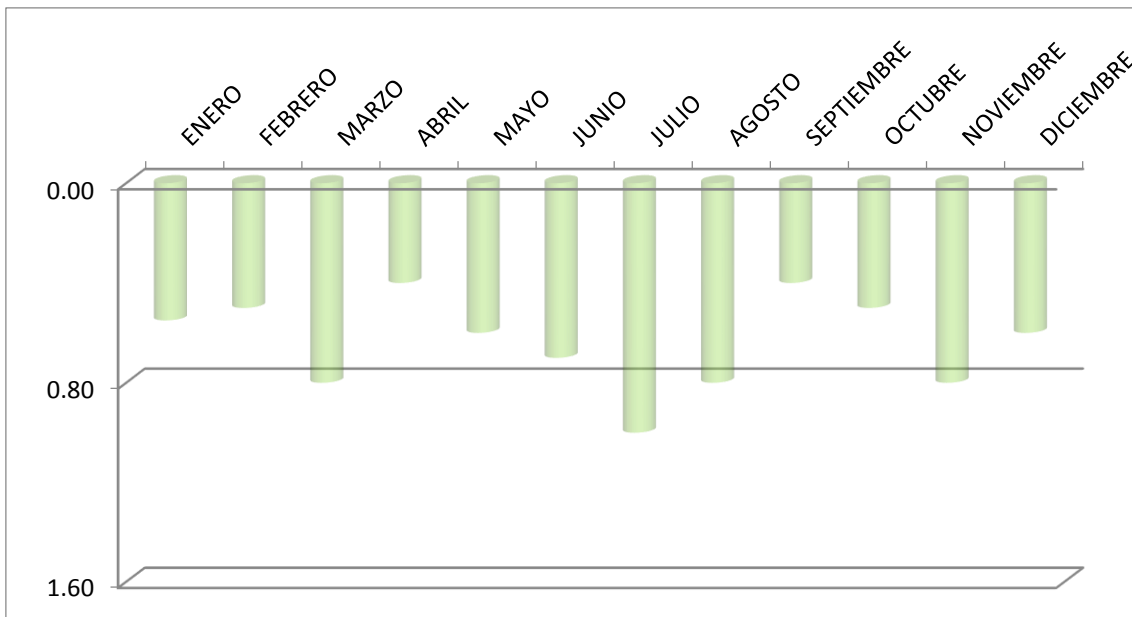


Figura 5: Transparencia medida en metros del año 2013, en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán. (Fuente: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA), División de control, calidad ambiental y manejo de lagos. (2013). *Informe Diciembre del 2013*).

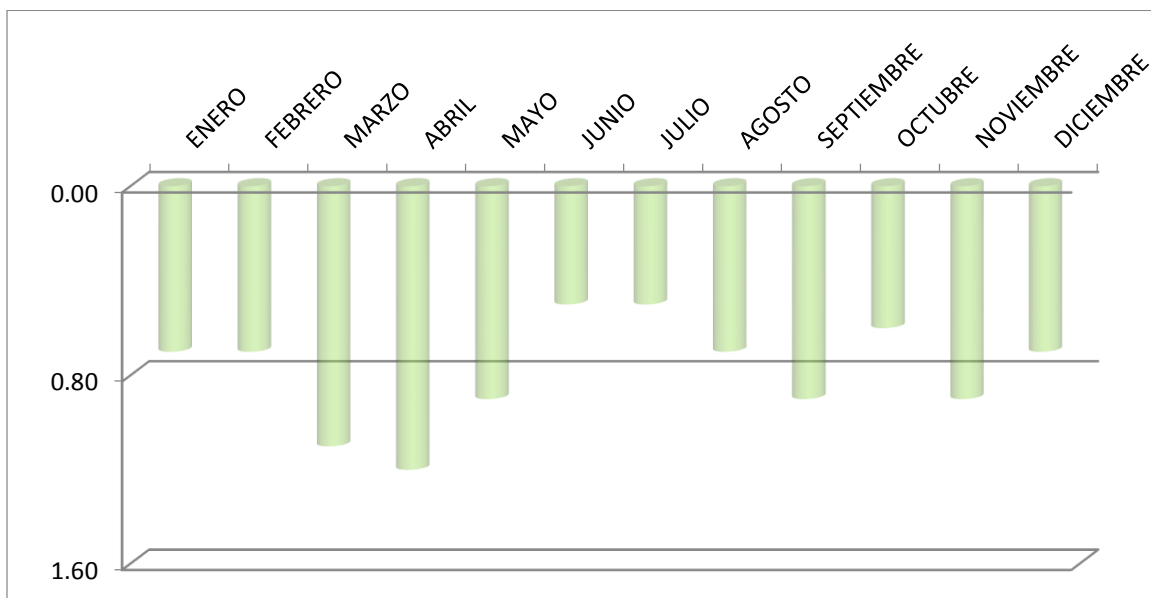


Figura 6: Transparencia medida en metros del año 2013, en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán. (Fuente: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA), División de control, calidad ambiental y manejo de lagos. (2013). *Informe Diciembre del 2013*).

2. Temperatura

La temperatura del agua regula procesos vitales en los organismos acuáticos, ejerce una marcada influencia sobre la reproducción y el crecimiento. También afecta las propiedades físicas y químicas en un ecosistema (Fuentes, F; Massol, A, 2002, pp. 3).

La radiación solar calienta el agua cercana a la superficie, generando una capa de agua tibia y menos densa sobre una capa de agua más fría y densa. En consecuencia, el cuerpo de agua se estratifica en tres zonas o capas de agua (Fuentes, F; Massol, A, 2002, pp. 4):

- Epilimnio: La capa de agua más superficial, de menor densidad y mayor temperatura
- Hipolimnio: La zona más profunda, de mayor densidad y menor temperatura.
- Metalimnio: Zona intermedia entre el epilimnio y el hipolimnio, con una densidad intermedia.

En cuerpos de agua dulce como lagos y lagunas ubicados en zonas tropicales se puede producir estratificación térmica estable (duradera), aún en ambientes que presentan diferencias de temperatura de 1 y 3°C entre el agua de la superficie y el agua del fondo. Los periodos de circulación en estos lagos son poco frecuentes y de corta duración (Fuentes, F; Massol, A, 2002, pp. 4).

La temperatura afecta las propiedades del agua incluyendo: la densidad, la viscosidad, la tensión superficial, el pH, la capacidad del agua para retener gases en solución, y la solubilidad de moléculas orgánicas e inorgánicas que se generan en el ambiente acuático o que acceden a este desde la litosfera (Fuentes, F; Massol, A, 2002, pp.10).

La viscosidad aumenta la resistencia al desplazamiento de organismos móviles a través del medio acuoso. La viscosidad del agua es mayor a temperaturas bajas, razón por la cual plantas y animales que flotan en aguas templadas tienen aparentemente una menor necesidad de desarrollar extensiones anatómicas que les ayuden a flotar, en comparación con los organismos que flotan en aguas cálidas (Fuentes, F; Massol, A, 2002, pp. 11).

El agua presenta una tensión superficial relativamente alta, debido a la fortaleza combinada de sus puentes de hidrógeno. La tensión superficial del agua disminuye según aumenta la temperatura. Dicha relación puede afectar la habilidad de varios organismos, para utilizar la superficie de ambientes acuáticos como hábitat. La temperatura también interviene en el pH del agua, al afectar la razón de disociación de moléculas que se comportan como ácidos o bases (Fuentes, F; Massol, A, 2002, pp. 11).

La reducción en la solubilidad de oxígeno, conforme aumenta la temperatura, es uno de los resultados de la contaminación térmica de cuerpos de agua naturales. Dicho efecto es más sobresaliente en lagos profundos. Dada la diferencia en densidad entre aguas cálidas y aguas frías, la masa de agua caliente se localiza sobre las masas de aguas "frías" (menos calientes) impidiendo así la difusión del oxígeno a las capas profundas. Esta situación afecta el metabolismo de las especies aeróbicas en el cuerpo de agua (Fuentes, F; Massol, A, 2002, pp. 12).

La temperatura afecta la solubilidad de sustratos que se generan en el ambiente acuático y de sustratos de origen exógeno. En este último grupo incluimos moléculas arrastradas al cuerpo de agua vía la precipitación, escorrentías y descargas de origen antropogénico (Fuentes, F; Massol, A, 2002, pp. 13).

a) Temperatura en el lago de Amatitlán

Se tienen registros de mediciones de temperatura de tres décadas, de 1970 a 1979, de 1990 a 1999 y de 2000 a 2008 así como datos recientes que comprenden los años del 2009 al 2013.

En la figura 7 se puede observar que en la década de 1990 a 1999 hay un aumento considerable de la temperatura en comparación con las otras dos décadas. Con fines prácticos puede no ser relevante ya que la mayor variación no llega a sobrepasar 1.5°C. También se puede observar que en la década de 1970 a 1979 los valores medios de temperatura del centro oeste eran menores en relación al centro este, en la década de 1990 a 1999 la media de temperatura para el centro este y oeste presentan valores muy similares y en la década del 2000 al 2008 la media de temperatura del centro oeste es superior a la del centro este (Barrientos, M, 2009, pp. 4-5).

En la figura 8 se puede observar que los valores medios de temperatura para las décadas de 1970-1979, 1990-1999 y 2000-2008, son mayores en época lluviosa en comparación de la época seca (Barrientos, M, 2009, pp. 6).

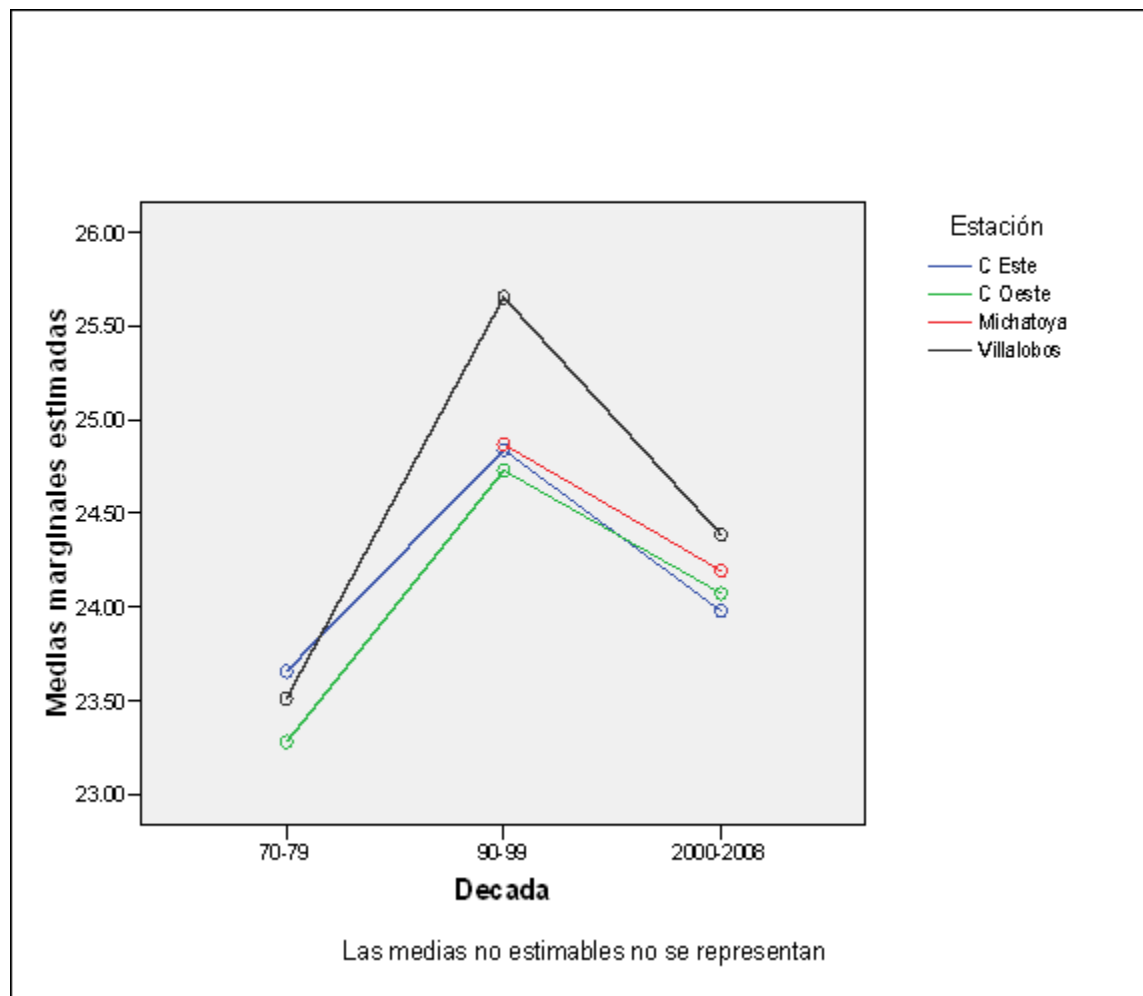


Figura 7: Valores medios de temperatura en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$), durante las décadas de 1970 a 1979, 1990 a 1999 y de 2000 a 2008, en diferentes sitios de muestreo del lago de Amatitlán. (Fuente: Barrientos, M. (2009). *Dinámica de algunas características físico-químicas del agua del lago de Amatitlán en el periodo 1968-2008*. Guatemala).

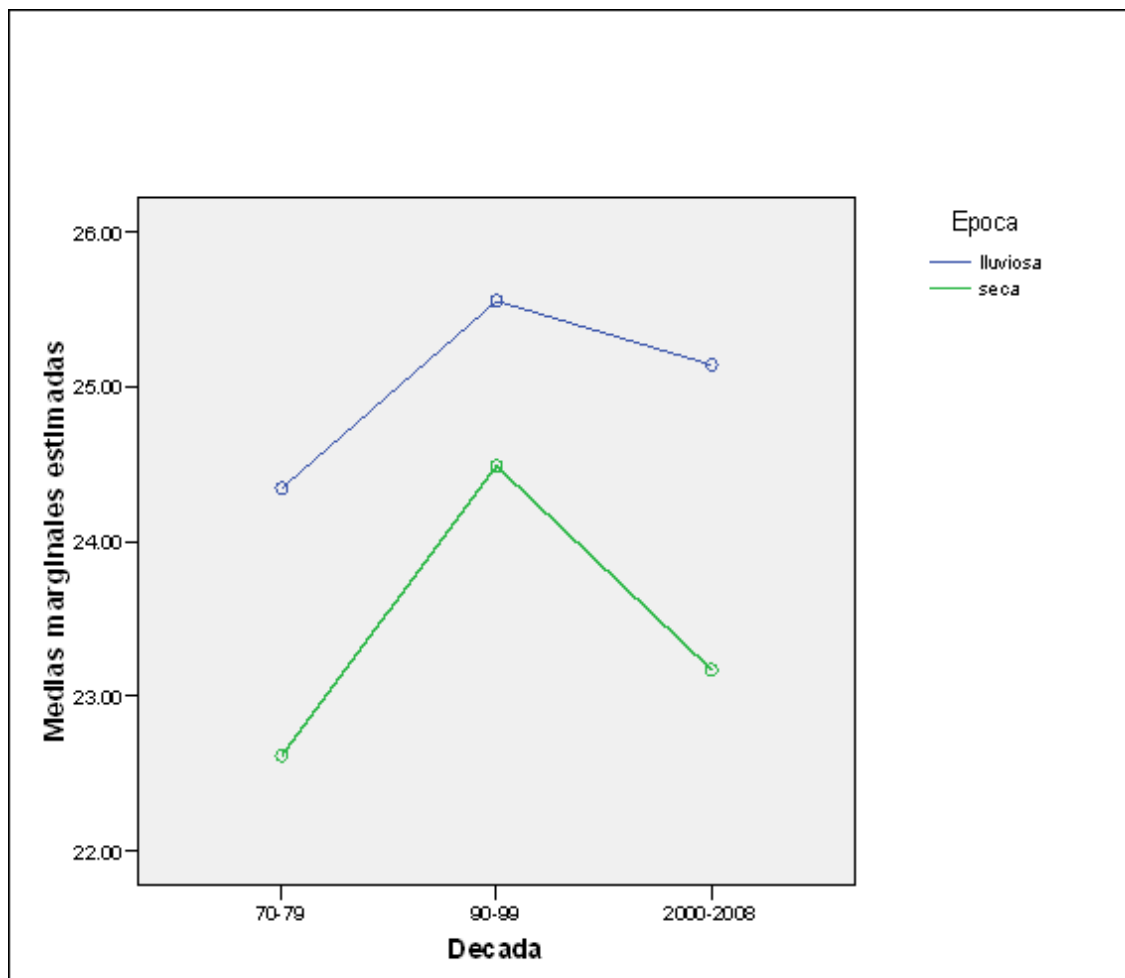


Figura 8: Valores medios de temperatura en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$), en época seca y lluviosa durante las décadas de 1970 a 1979, 1990 a 1999 y de 2000 a 2008, del lago de Amatitlán. (Fuente: Barrientos, M. (2009). *Dinámica de algunas características físico-químicas del agua del lago de Amatitlán en el periodo 1968-2008*. Guatemala).

Como se puede observar en el cuadro 6, los promedios anuales de temperatura de los años 2009 al 2013 son mayores en el centro oeste en relación al centro este. También es posible observar un aumento en los valores promedios de temperatura en época lluviosa en relación a la época seca.

Cuadro 6: Promedios anuales de temperatura medida en grados Celsius (°C), durante los años 2009 al 2013, tomados a nivel superficial en los sitios de muestreo ubicados en el centro este y centro oeste del lago de Amatitlán.

Año	Centro Este (°C)			Centro Oeste (°C)		
	Promedio época seca	Promedio época lluviosa	Promedio anual	Promedio época seca	Promedio época lluviosa	Promedio anual
2009	22.9	25.8	24.3	23.0	26.6	25.0
2010	24.0	25.8	25.0	24.3	26.5	25.6
2011	23.7	26.1	25.1	24.1	25.9	25.2
2012	22.8	25.9	24.5	23.1	26.7	25.1
2013	23.8	25.9	24.9	24.4	25.8	25.2

Fuente: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA). Datos de la División de control, calidad ambiental y manejo de lagos

En la figura 9 se pueden observar los perfiles de temperatura del año 2013 del centro este del lago de Amatitlán, la diferencia de temperatura entre el agua de la superficie y el agua fondo es mayor en época lluviosa, en comparación de la época seca (AMSA, 2013, pp. 7).

En la figura 10 se pueden observar los perfiles de temperatura del año 2013 del centro oeste del lago de Amatitlán, la diferencia de temperatura entre el agua de la superficie y el agua del fondo también es mayor en época lluviosa, en comparación de la época seca. Sin embargo esta diferencia es menor en comparación al centro este (AMSA, 2013, pp. 7).

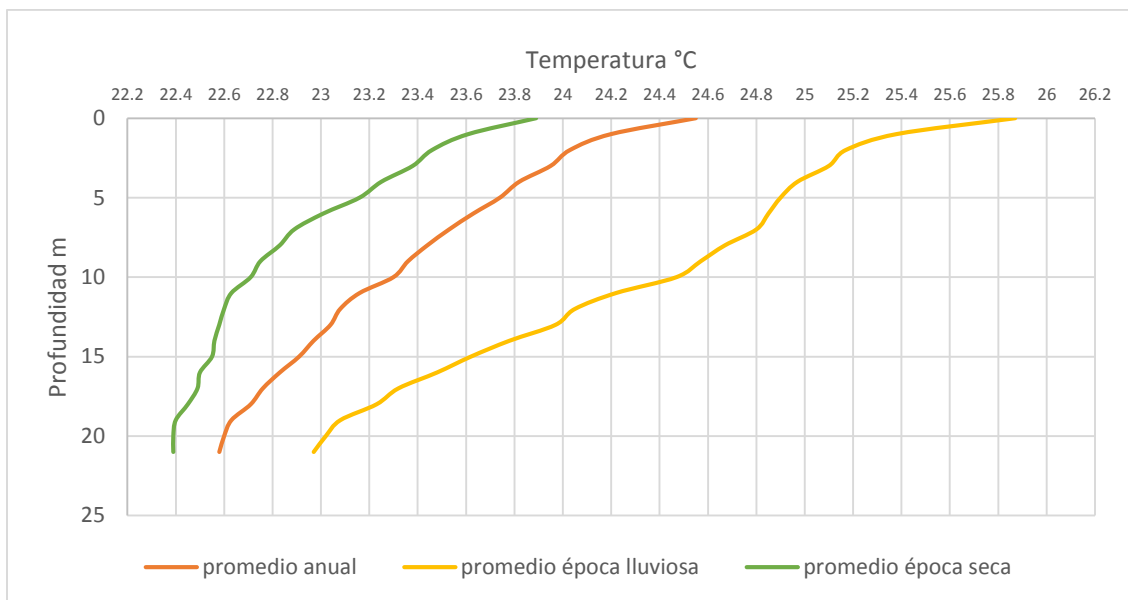


Figura 9: Perfiles de temperatura medida en grados Celsius (°C), del año 2013 del sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán. (Fuente: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA), División de control, calidad ambiental y manejo de lagos. (2013). *Informe Diciembre del 2013*).

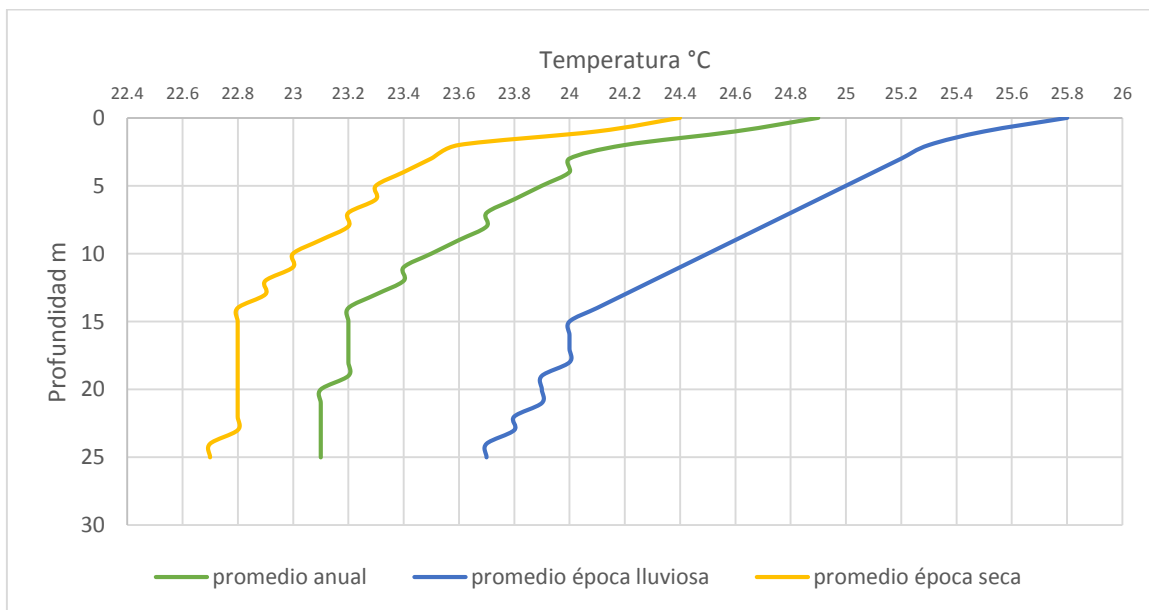


Figura 10: Perfiles de temperatura medida en grados Celsius (°C), del año 2013 del sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán. (Fuente: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA), División de control, calidad ambiental y manejo de lagos. (2013). *Informe Diciembre del 2013*).

3. Potencial de hidrógeno (pH)

El potencial de hidrógeno (pH) indica el logaritmo del inverso de la concentración de iones hidrógeno libres (H^+). El pH de las aguas naturales es regido principalmente por la interacción de los iones hidrogeno (H^+) procedentes de la disociación del ácido carbónico H_2CO_3 , y de los iones hidróxido (OH^-) resultantes de la hidrólisis del bicarbonato (Wetzel, R, 1981, pp. 157).

Los cuerpos de agua con valores de pH inferiores a 4, se encuentran generalmente en regiones volcánicas que reciben ácidos minerales fuertes como el ácido sulfúrico. Las cuencas de drenaje con presencia de pirita en las rocas y arcillas, pueden oxidarse y dar lugar a ácido sulfúrico, produciendo en los lagos aportes ácidos. En aguas naturales ricas en materia orgánica disuelta se encuentran valores bajos de pH. La precipitación en zonas de alta polución, puede modificar significativamente el pH de aguas poco tamponadas. En las regiones endorreicas, donde los lagos contienen concentraciones altas de sosa, se encuentran valores elevados de pH. Lagos de origen calcáreo generalmente tienen valores de pH superiores a 8, en su lugar lagos con drenajes de rocas ígneas no están tan regulados por un sistema tamponado, por lo que presentan valores de pH inferiores a 7 (Wetzel, R, 1981, pp. 157).

El potencial de hidrógeno pH, regula procesos biológicos mediados por enzimas; la disponibilidad de nutrientes esenciales que limitan el crecimiento microbiano en muchos ecosistemas; la movilidad de metales pesados tales como cobre, que es tóxico para muchos microorganismos; así como también afecta o regula la estructura y función de macromoléculas y organelos. Los valores de pH no pueden promediarse aritméticamente, sino que se deben estimar mediante el logaritmo de los inversos (Wetzel, R, 1981, pp. 158).

a) Potencial de hidrógeno (pH) en el lago de Amatitlán

Se tienen registros de mediciones de pH desde el año 1960 hasta el 2013. Como puede observarse en la figura 11 los valores de la media de pH aumentaron

considerablemente en la década del 2000 al 2008 en relación con la década anterior. También se puede apreciar que los valores de la media de pH son mayores en el centro este en relación al centro oeste (Barrientos, M, 2009, pp. 10).

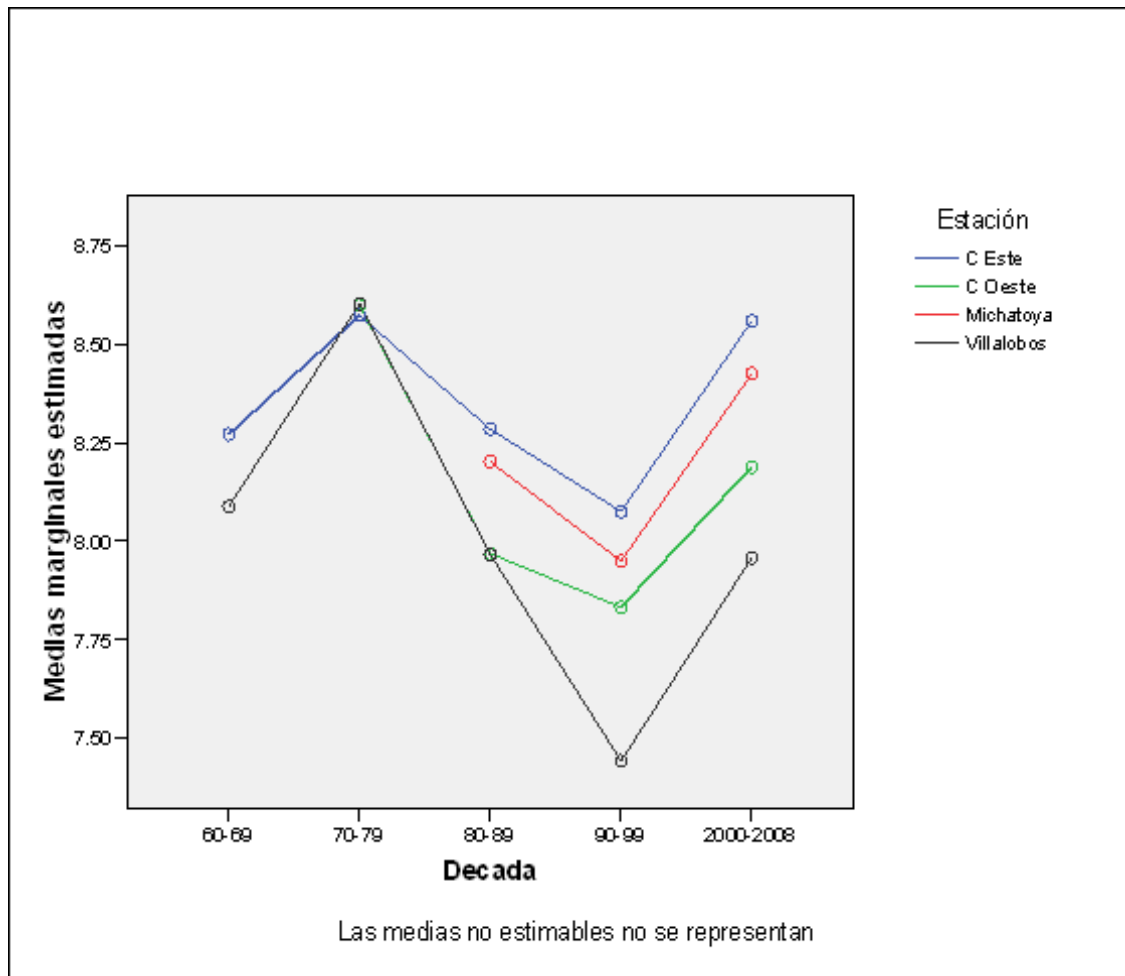


Figura 11: Valores medios de potencial de hidrógeno (pH), durante las décadas 1960 a 1969, 1970 a 1979, 1980 a 1989, 1990 a 1999 y de 2000 a 2008, en diferentes sitios de muestreo del lago de Amatitlán (Fuente: Barrientos, M. (2009). *Dinámica de algunas características físico-químicas del agua del lago de Amatitlán en el periodo 1968-2008*. Guatemala).

Como puede observarse en la figura 12 los valores medios de pH para las décadas comprendidas entre 1960 al 2008, son mayores en época lluviosa en comparación de la época seca (Barrientos, M, 2009, pp. 11).

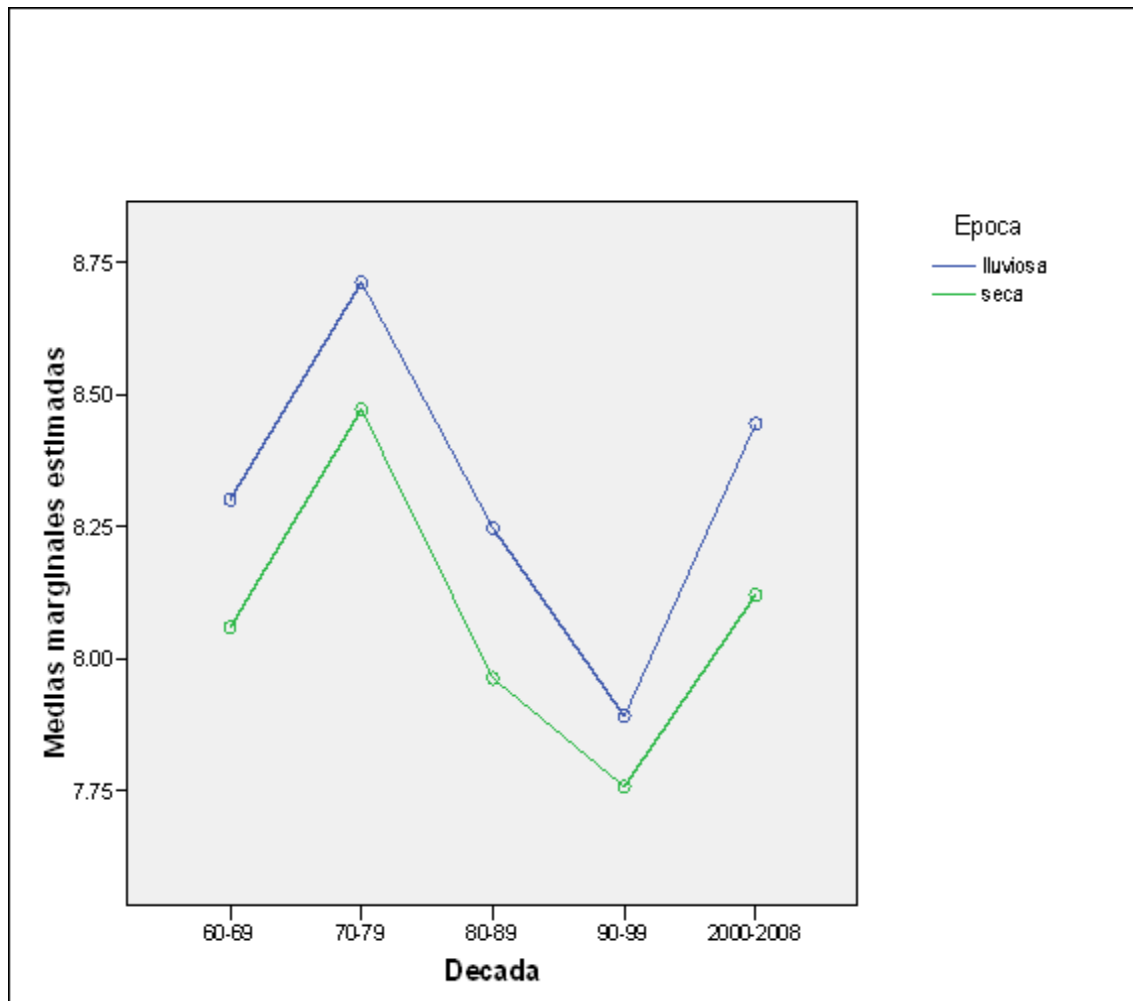


Figura 12: Valores medios de potencial de hidrógeno (pH), en época seca y lluviosa durante las décadas de 1960 a 1969, 1970 a 1979, 1980 a 1989, 1990 a 1999 y de 2000 a 2008, del lago de Amatitlán. (Fuente: Barrientos, M. (2009). *Dinámica de algunas características físico-químicas del agua del lago de Amatitlán en el periodo 1968-2008*. Guatemala).

Como se puede observar en el cuadro 7 los promedios anuales de pH de los años 2009 al 2013, son mayores en el centro este en comparación del centro oeste. También es posible observar un aumento en los valores promedios de pH en época lluviosa en relación a la época seca.

Cuadro 7: Promedios anuales de potencial de hidrógeno (pH), durante los años 2009 al 2013, tomados a nivel superficial en los sitios de muestreo ubicados en el centro este y centro oeste del lago de Amatitlán.

Año	Centro Este			Centro Oeste		
	Promedio época seca	Promedio época lluviosa	Promedio anual	Promedio época seca	Promedio época lluviosa	Promedio anual
2009	8.88	9.03	8.96	9.12	8.41	8.91
2010	9.05	9.36	9.27	8.60	9.02	8.91
2011	9.17	9.47	9.39	8.45	9.16	9.01
2012	9.08	9.38	9.28	8.11	9.26	9.02
2013	9.01	9.09	9.12	8.57	8.81	8.77

Fuente: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA). Datos de la División de control, calidad ambiental y manejo de lagos

Como puede observarse en las figuras 13 y 14, el pH disminuye a medida que aumenta la profundidad del lago, las diferencias entre el pH del agua de la superficie y el agua del fondo son más grandes en época lluviosa, en comparación con la época seca (AMSA, 2013, pp. 9).

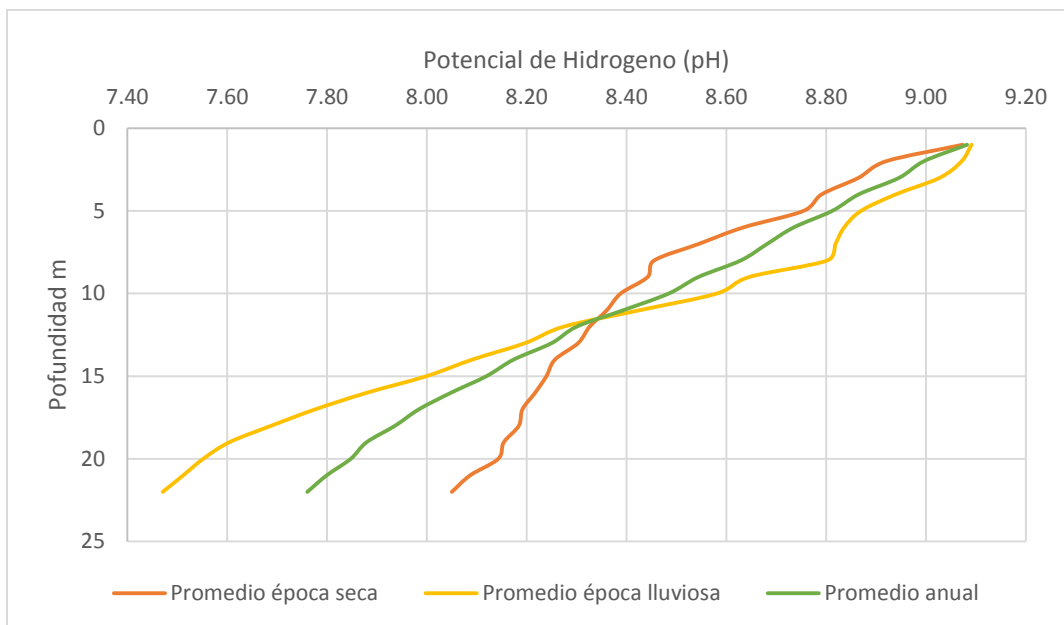


Figura 13: Perfiles de potencial de hidrógeno (pH), del año 2013 del sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán. (Fuente: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA), División de control, calidad ambiental y manejo de lagos. (2013). *Informe Diciembre del 2013*).

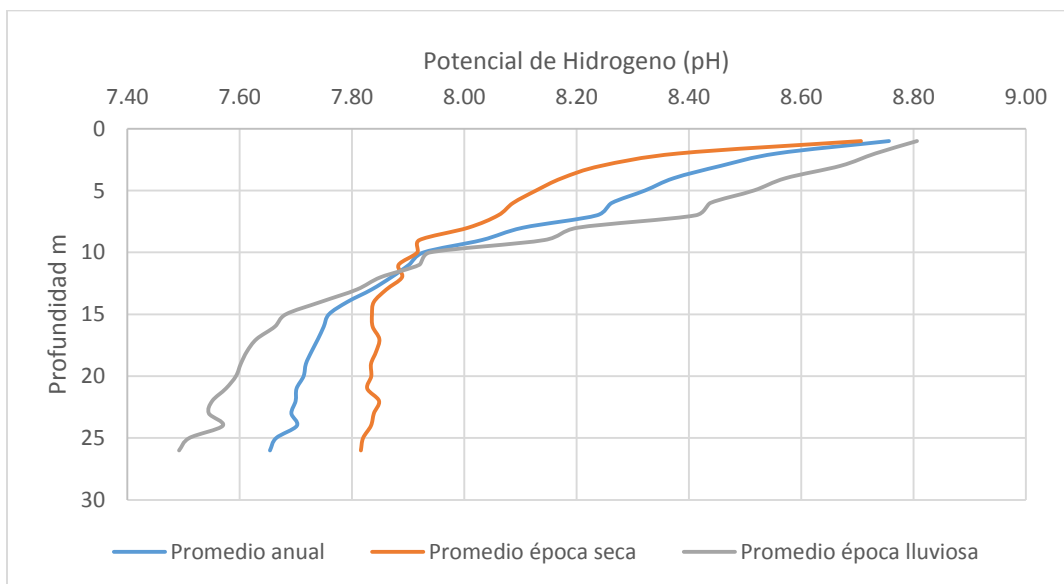


Figura 14: Perfiles de potencial de hidrógeno (pH), del año 2013 del sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán. (Fuente: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA), División de control, calidad ambiental y manejo de lagos. (2013). *Informe Diciembre del 2013*).

4. Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto es esencial para el metabolismo de los organismos acuáticos que presentan una respiración aerobia. Los principales factores de consumo de oxígeno en un cuerpo de agua, se dan por la oxidación de materia orgánica en suspensión y por la respiración de microorganismos descomponedores. También hay consumo de oxígeno por oxidación química de materia orgánica y oxidación fotoquímica por luz ultravioleta (Fuentes, F; Massol, A, 2002, pp 1).

La solubilidad de oxígeno en un cuerpo de agua se ve afectado por diversos factores como la temperatura, presión atmosférica, salinidad, contaminación, entre otros. La solubilidad del oxígeno aumenta al disminuir la temperatura del agua. En lagos tropicales que presentan mayores temperaturas que en zonas templadas, hay menor concentración de oxígeno disponible. La solubilidad de oxígeno disuelto es baja y la demanda es mayor debido al aumento de la tasa de oxidación biológica. A menor presión atmosférica, menor será la solubilidad del oxígeno, debido a la disminución de la presión parcial del gas. La contaminación disminuye la solubilidad de oxígeno en el agua, debido a que introduce sustancias químicamente oxidables que consumen el oxígeno disponible en el cuerpo de agua (Fuentes, F; Massol, A, 2002, pp. 2).

La distribución de oxígeno disuelto en los lagos puede presentar tres tipos de perfiles (Roldán & Ramírez, 2008, pp. 187 -188):

- Perfil ortogrado de oxígeno:

Si un lago es poco productivo u oligotrófico, la concentración de oxígeno respecto a la profundidad disminuye gradualmente, también en el periodo de estratificación térmica. Este tipo de perfil indica bajo consumo de oxígeno.

- Perfil clinógrado:

Se presenta cuando ocurre una disminución de oxígeno progresiva hacia al fondo. El hipolimnion es la zona más profunda, de mayor densidad y menor temperatura. En el hipolimnion se dan frecuentemente procesos de oxidación, como resultado las

concentraciones de oxígeno se van reduciendo en el periodo de estratificación. El contenido de oxígeno en el hipolimnion en lagos muy productivos o eutróficos se agota rápidamente, debido a los procesos oxidativos.

- Perfil heterógrado:

Puede ser positivo o negativo. La variación más común consiste en la de tipo positiva. El perfil heterógrado positivo consiste en un aumento de oxígeno en el metalimnion (zona intermedia entre el epilimnio y el hipolimnio, con una densidad intermedia) en la estratificación térmica. Cuando la solubilidad de oxígeno en el epilimnion (la capa de agua más superficial, de menor densidad y mayor temperatura) disminuye al aumentar las temperaturas en verano, y el consumo de oxígeno en el hipolimnion produce una reducción clinograda típica al aumentar la profundidad, puede aparecer un máximo de oxígeno en el metalimnion. Este máximo de oxígeno es ocasionado mayoritariamente por la producción de oxígeno debido a las poblaciones de algas, cuyo desarrollo supera las pérdidas sufridas por sedimentación. En esta zona la disponibilidad de nutrientes es mayor, las cianofíceas particularmente el género *Osillatoria* son las principales causantes de este fenómeno. El perfil heterógrado negativo es menos frecuente, se da cuando hay un mínimo de oxígeno en el metalimnion. Se presenta por un aumento en las tasas de respiración y descomposición en el metalimnion, por acumulación de materia orgánica facilitada por la mayor densidad del agua en esta zona. También acontece por la presencia de poblaciones densas de zooplancton.

a) Porcentaje de saturación de oxígeno:

Corresponde al porcentaje máximo de oxígeno que puede disolverse en el agua a una presión y temperatura determinada. Como incluye una corrección por altitud permite comparar lagos a diferentes altitudes. En ambientes acuáticos naturales la sobresaturación de oxígeno puede estar producida por una alta tasa de actividad fotosintética. En aguas contaminadas el porcentaje de saturación de oxígeno es menor al 50%, ver el cuadro 8 (Fuentes, F; Massol, A, 2002, pp. 3).

Cuadro 8: Calidad del agua en función del porcentaje de saturación de oxígeno

Calidad	% de saturación de oxígeno
Buena	90
Regular	89 – 75
Dudosa	74 – 50
Contaminada	< 50

Fuente: Lynch y Poole (1979) En: Fuentes, F & Massol, A. (2002). *Manual de laboratorio ecología de microorganismos: Oxígeno disuelto*. Puerto Rico. Editorial Universidad de Puerto Rico Mayagüez.

b) Oxígeno disuelto en el lago de Amatitlán

Se tienen registros de las concentraciones de oxígeno disuelto desde el año 1970 hasta el 2013. Como se puede observar en la figura 15, los valores medios más altos en las concentraciones de oxígeno disuelto se presentaron en la década de 1970 a 1979. En las últimas tres décadas los promedios han permanecido sin variación significativa. En las décadas de 1970 a 1979, 1980 a 1989 y 2000 al 2008 los valores medios en las concentraciones de oxígeno disuelto fueron mayores en el centro este en relación al centro oeste (Barrientos, M, 2009, pp. 12).

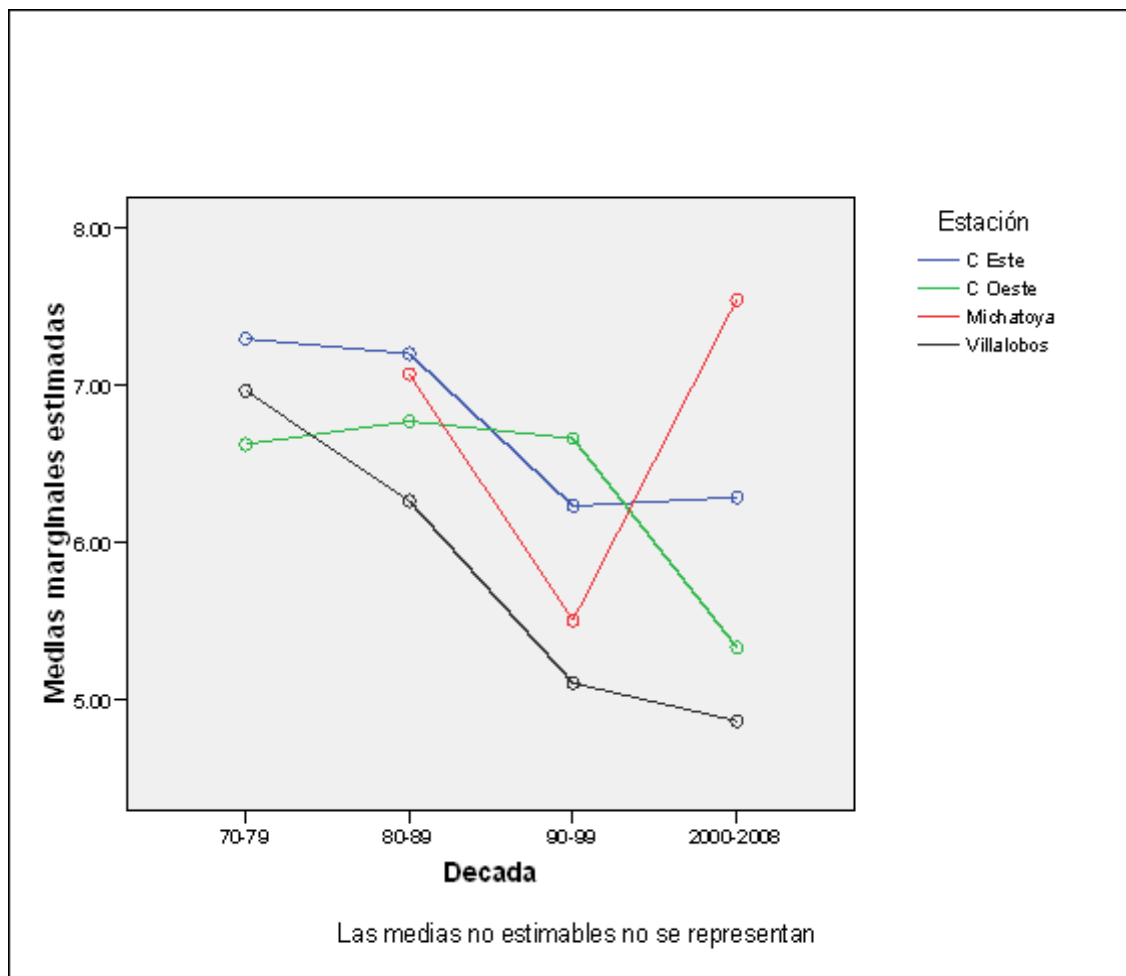


Figura 15: Valores medios de la concentración de oxígeno disuelto en mg/L durante las décadas 1970 a 1979, 1980 a 1989, 1990 a 1999 y de 2000 a 2008, en diferentes sitios de muestreo del lago de Amatitlán. (Fuente: Barrientos, M. (2009). *Dinámica de algunas características físico-químicas del agua del lago de Amatitlán en el periodo 1968-2008*. Guatemala).

En la figura 16 se puede observar que los valores medios en la concentración de oxígeno disuelto para las décadas de 1970 a 1999 son mayores en época seca en comparación de la época lluviosa (Barrientos, M, 2009, pp. 13).

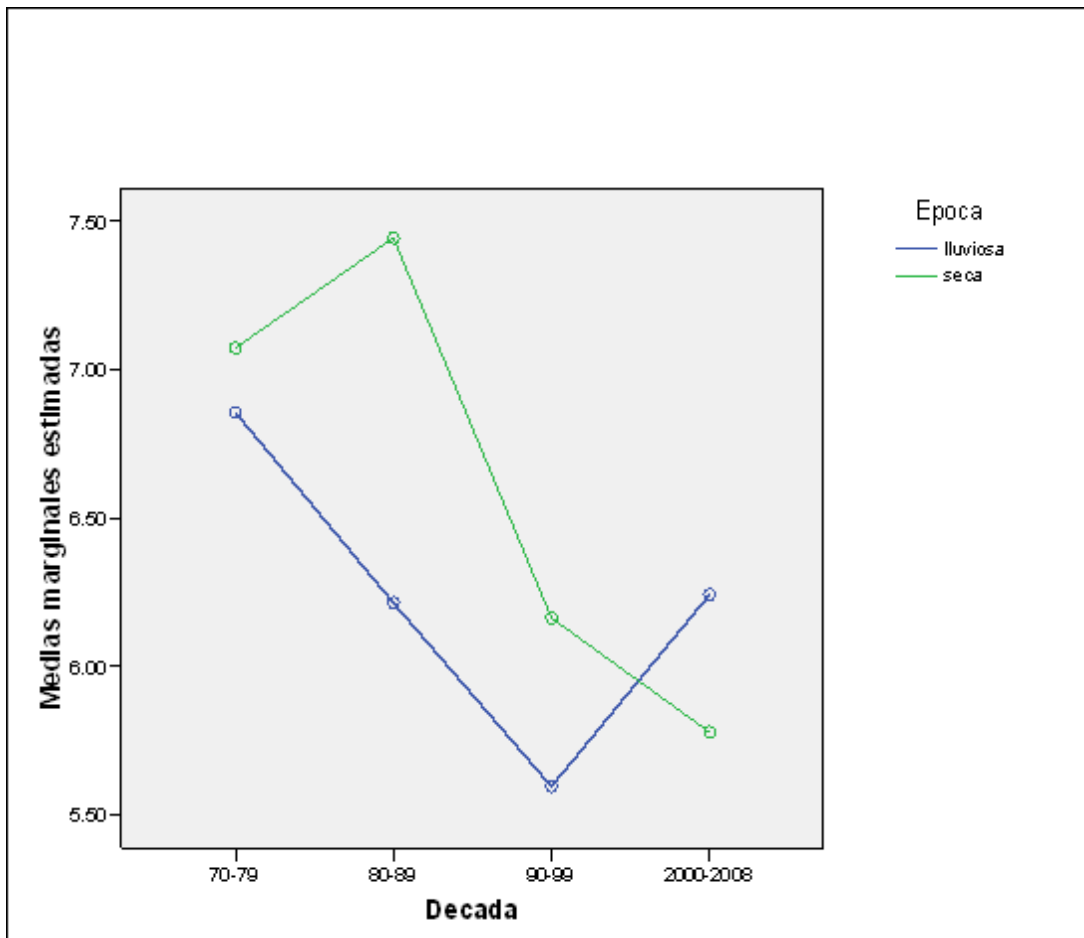


Figura 16: Valores medios de las concentraciones de oxígeno disuelto en mg/L en época seca y lluviosa durante las décadas de 1960 a 1969, 1970 a 1979, 1980 a 1989, 1990 a 1999 y de 2000 a 2008, del lago de Amatitlán. (Fuente: Barrientos, M. (2009). *Dinámica de algunas características físico-químicas del agua del lago de Amatitlán en el periodo 1968-2008*. Guatemala).

Como se puede observar en la figura 17, en el centro este durante la época lluviosa las concentraciones de oxígeno disuelto se agotan rápidamente entre los 8 y 12 metros y el hipolimnion presenta condiciones de anoxia. Como se puede apreciar en la figura 18, en el centro este durante la época seca hay una disminución gradual en las concentraciones de oxígeno disuelto hacia el fondo, sin embargo el hipolimnion no presenta condiciones de anoxia permanente. Como se puede observar en la figura 19 y 20, el hipolimnion del centro oeste presenta condiciones de anoxia permanente (AMSA, 2013, pp. 10).

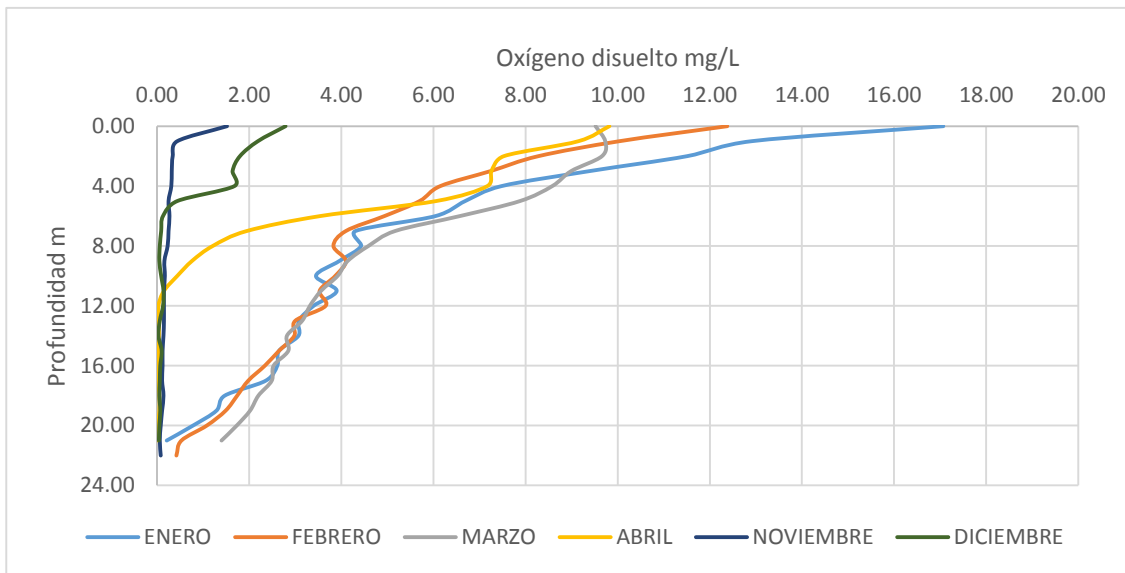


Figura 17: Perfiles de la concentración de oxígeno disuelto medido en mg/L durante la época seca del año 2013, en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán. (Fuente: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA), División de control, calidad ambiental y manejo de lagos. (2013). *Informe Diciembre del 2013*).

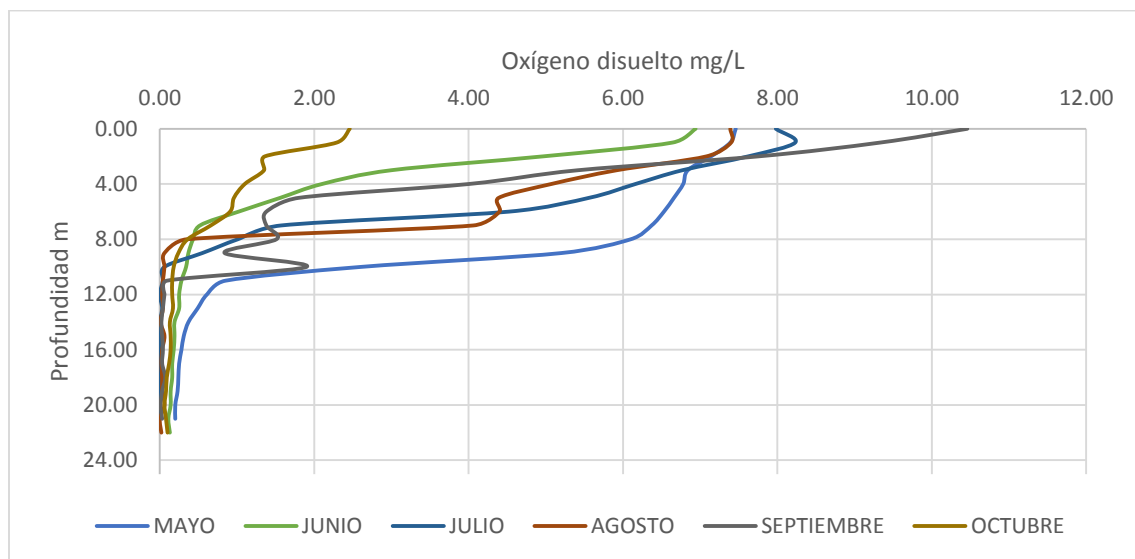


Figura 18: Perfiles de la concentración de oxígeno disuelto medido en mg/L durante la época lluviosa del año 2013, en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán. (Fuente: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA), División de control, calidad ambiental y manejo de lagos. (2013). *Informe Diciembre del 2013*).

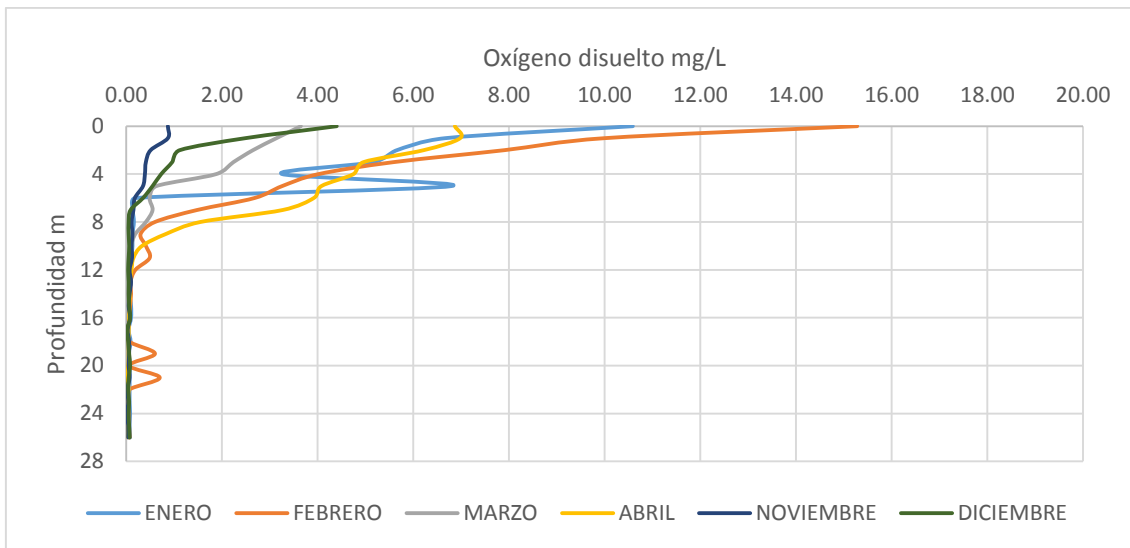


Figura 19: Perfiles de la concentración de oxígeno disuelto medido en mg/L durante la época seca del año 2013, en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán. (Fuente: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA), División de control, calidad ambiental y manejo de lagos. (2013). *Informe Diciembre del 2013*).

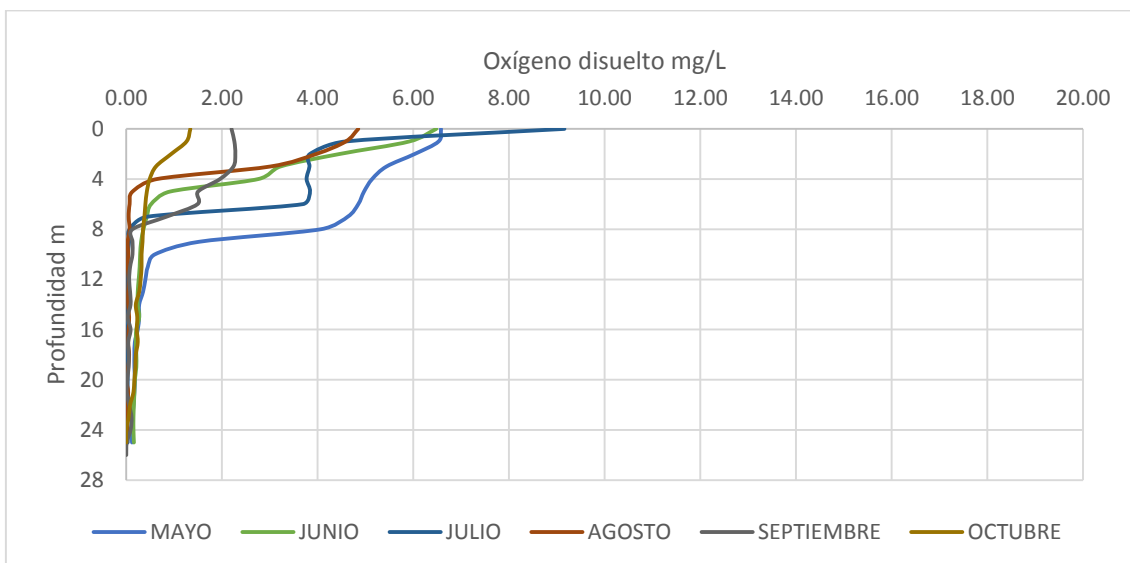


Figura 20: Perfiles de la concentración de oxígeno disuelto medido en mg/L durante la época lluviosa del año 2013, en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán. (Fuente: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA), División de control, calidad ambiental y manejo de lagos. (2013). *Informe Diciembre del 2013*).

Como se puede observar en el cuadro 9, el agua de la superficie generalmente se encuentra sobresaturada de oxígeno. El centro este presenta porcentajes mayores de sobresaturación de oxígeno en comparación del centro oeste.

Cuadro 9: Promedios anuales del porcentaje de saturación de oxígeno, durante los años 2009 al 2013, tomados a nivel superficial en los sitios de muestreo ubicados en el centro este y centro oeste del lago de Amatlán.

Año	Centro Este	Centro Oeste
	Promedio anual (%)	Promedio anual (%)
2009	127.5	111.5
2010	124.2	120.1
2011	131.6	131.4
2012	123.8	93.7
2013	117.2	85.9

Fuente: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatlán (AMSA). Datos de la División de control, calidad ambiental y manejo de lagos

5. Nitrógeno

El nitrógeno es un componente en la formación de proteínas, las cuales constituyen la base estructural de los seres vivos. En ausencia de nitrógeno no puede concebirse la vida en el agua ni en el planeta (Roldán & Ramírez, 2008, pp. 241).

El origen del nitrógeno en ambientes acuáticos puede tener diferentes orígenes, por la precipitación sobre la superficie del lago, fijación de nitrógeno elemental en el agua y sedimentos, y aportes debidos al drenaje superficial y subterráneo. El nitrógeno en aguas dulces puede presentarse en diversas formas, nitrato NO_3^- , nitrito NO_2^- , amoniacó NH_3 , ion amonio NH_4^+ , óxido nitroso N_2O , N_2 y nitrógeno orgánico disuelto (péptidos, purinas, aminas) (Wetzel, R, 1981, pp. 170).

a) Fijación microbiológica de nitrógeno molecular

La fijación de nitrógeno en las aguas abiertas de los lagos se ha relacionado estrictamente con las cianofíceas con heterocistes, células especializadas aisladas y generalmente filamentosas, aunque se han encontrado formas unicelulares que no producen heterocistes y fijan nitrógeno. Las algas fijadoras de nitrógeno y algunas bacterias fotosintetizadoras pueden fijar solo pequeñas cantidades de nitrógeno en la oscuridad. Normalmente a pleno sol el proceso de fijación de nitrógeno esta inhibido en la superficie, alcanza un máximo a cierta profundidad y disminuye rápidamente de manera exponencial conforme aumenta la profundidad. La formación de heterocistes y la fijación de nitrógeno por las cianofíceas es inhibida en presencia de nitrógeno en forma de nitrato o amonio, la supresión de heterocistes por el nitrato es a menudo solo parcial, incluso a concentraciones muy elevadas. En presencia de cantidades considerables de nitrógeno inorgánico en el agua, puede darse una fijación reducida de N_2 por cianofíceas (Wetzel, R, 1981, pp. 171).

Entre las cianofíceas capaces de fijar nitrógeno se encuentran los géneros *Nostoc*, *Anabaena* y *Aphanizomenon*. Estas existen en gran diversidad de hábitats y los medios ácidos se consideran los más propicios para su desarrollo (Roldán & Ramírez, 2008, pp. 244).

b) Fijación microbiológica de nitrógeno molecular en el lago de Amatitlán

En los años 2010, 2011, 2012 y 2013 se encontraron cianofíceas capaces de fijar nitrógeno en los puntos centro este y centro oeste del lago de Amatitlán. Se identificaron los géneros de *Anabaena*, *Nostoc* y *Aphanizomenon*, ver cuadro 10.

Como puede observarse en el cuadro 10, la cianofícea del género *Anabaena* está presente en los años 2010, 2011, 2012 y 2013 en los puntos centro este y centro oeste del lago de Amatitlán. La cianofícea del género *Nostoc* está presente en el año 2011 en el punto centro este y centro oeste, en el 2012 en el punto centro este, y en el 2013 en el punto centro este y centro oeste del lago de Amatitlán.

La cianofícea del género *Aphanizomenon* está presente en el año 2013 en el punto centro este del lago de Amatitlán.

Cuadro 10: Presencia de cianofíceas fijadoras de nitrógeno durante los años 2010 al 2013, recolectadas a nivel superficial en sitios de muestreo ubicados en el centro este y centro oeste del lago de Amatitlán

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2010	CE	X	O	X	O	O	O	O	X	O	O	O	ND
	CO	O	X	X	X	O	O	O	O	X	O	X	O
2011	CE	X	X	X	X	X	X	ND	O	X	ND	O	X
	CO	X	X	X	O	X	X	X	ND	X	X	ND	ND
2012	CE	ND	X	O	X	O	X	X	X	X	X	X	X
	CO	ND	X	X	O	X	X	O	O	O	X	O	O
2013	CE	O	X	O	X	O	X	O	X	X	X	X	O
	CO	O	X	X	O	O	O	O	O	O	X	O	X

Fuente: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA). Datos de la División de control, calidad ambiental y manejo de lagos

Nota: CE (Centro Este), CO (Centro Oeste), ND (No Disponible), X (presencia), O (Ausencia)

c) Nitrógeno total

El nitrógeno en el agua se puede encontrar en forma de gas, como nitrógeno inorgánico disuelto (nitrato, nitrito y amonio), como nitrógeno orgánico disuelto y como nitrógeno orgánico particulado. La sumatoria de todas estas formas de nitrógeno, da como resultado el nitrógeno total. La determinación de nitrógeno total en un cuerpo de agua es relevante, ya que a diferencia del nitrógeno de especies inorgánicas, el nitrógeno total también está constituido por nitrógeno orgánico. Este último representa una reserva para la conversión a formas más asequibles para la cadena trófica, por lo cual, es de importancia en los procesos de eutroficación. El nitrógeno orgánico puede convertirse en amoníaco por las bacterias saprofitas, siendo por lo tanto una fuente energética para las bacterias autótrofas que lo transforman en iones nitrito y nitrato. Estas especies requieren 4.5 veces más

oxígeno que el que requiere el amoníaco, por lo que afecta los niveles de oxígeno disuelto (Suárez & Vidal, 2008, pp. 1).

Cuadro 11: Clasificación de lagos de acuerdo al contenido de Nitrógeno total, según diferentes autores

Tipo de lago	Nitrógeno Total (mg/L)	
	Sakamoto (1966)	OECD(1982)
Oligotrófico	0.02 – 0.2	0.661
Mesotrófico	0.1 – 0.7	0.753
Eutrófico	0.5 – 1.33	1.875

Sakamoto (1966), Organization for Economic Cooperation and Development (1982). En: Vega, L. Paz, O. (2004). *Condiciones tróficas de la bahía de Ayagachi del lago Titicaca*. Bolivia. Editorial Instituto de ingeniería sanitaria y ambiental, Universidad mayor de San Andrés.

d) Nitrógeno de amonio

El amonio es el principal producto final de descomposición de la materia orgánica realizada por las bacterias heterótrofas, tanto a partir de proteínas así como de otros compuestos orgánicos nitrogenados. El amonio también constituye uno de los principales productos de excreción de los animales acuáticos, sin embargo la cantidad de nitrógeno de amonio obtenido por esta vía es muy inferior a la derivada de la descomposición (Wetzel, R, 1981, pp. 178).

El amonio en el agua se presenta principalmente en forma de ion amonio (NH_4^+), y como hidróxido de amonio (NH_4OH), siendo el hidróxido de amonio altamente tóxico para organismos acuáticos, especialmente para los peces. Las proporciones entre NH_4^+ y NH_4OH están regidas por las dinámicas de pH y temperatura. A un pH de 6 se espera que la relación NH_4^+ y NH_4OH sea de 3000 a 1, a un pH de 7 de 300 a 1, a un pH de 8 de 30 a 1, y a un pH de 9 de 1 a 1. Los niveles de NH_4OH pueden elevarse en lagos eutróficos con valores de pH altos, en periodos de gran actividad fotosintética (Wetzel, R, 1981, pp. 178).

El nitrógeno de amonio en aguas oxigenadas es relativamente escaso. El ingreso apreciable de materia orgánica a un lago, acelera la acumulación de nitrógeno de amonio en el hipolimnion, particularmente cuando este se vuelve anóxico. Bajo condiciones de anaerobia la nitrificación bacteriana cesa. El amonio es fuertemente adsorbido por materia particulada y coloidal, especialmente en lagos alcalinos. En condiciones de anoxia la capacidad de adsorción de los sedimentos queda reducida, el resultado es una marcada liberación de nitrógeno de amonio del sedimento. En aguas superficiales no contaminadas los valores de nitrógeno en forma de amonio pueden oscilar desde 0 hasta 5 mg/L, aunque generalmente se encuentran por debajo de este valor; y pueden alcanzar más de 10 mg/L en el hipolimnion anaeróbico en lagos eutróficos. Los valores de nitrógeno de amonio en lagos europeos con características de eutrofia oscilan en un rango de 2 a 15 mg/L, ver el cuadro 12 (Wetzel, R, 1981, pp. 179).

Cuadro 12: Clasificación de lagos europeos de acuerdo con el contenido de nitrógeno en sus tres formas

Tipo de lago	Amoníaco (mg/L)	Nitratos (mg/L)	Nitritos (mg/L)
Olígotrófico	0.0 – 0.3	0.0 – 1.0	0.0 – 0.5
Mesotrófico	0.3 – 2.0	1.0 – 5.0	0.5 – 5.0
Eutrófico	2.0 – 15.0	5.0 – 50.0	5.0 – 15.0

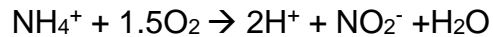
Fuente: Esteves (1998) En: Roldán, G; Ramírez, J. (2008). *Fundamentos de limnología neotropical*. Colombia. Universidad de Antioquia.

e) Nitrógeno de nitratos y nitritos

Los compuestos nitrados pasan por una serie de etapas gobernadas por bacterias. El proceso de nitrificación da lugar a la formación de nitritos y nitratos a partir de la oxidación del nitrógeno de amonio presente en el cuerpo de agua. La nitrificación se define como la conversión biológica de los compuestos nitrogenados orgánicos e inorgánicos de un estado reducido a otro más oxidado. La nitrificación predomina

en lagos oligotróficos con un hipolimnion rico en oxígeno. En lagos eutróficos con un hipolimnion anóxico predomina la amonificación (Wetzel, R, 1981, pp. 179)

El proceso de nitrificación ocurre en dos pasos, en la primera reacción el ion amonio (NH_4^+) se transforma a ion nitrito (NO_2^-) por acción de las bacterias del género *Nitrosomonas*. La reacción se expresa de la forma (Wetzel, R, 1981, pp. 180-181):



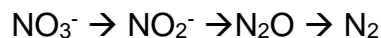
En el segundo paso el ion nitrito (NO_2^-) se transforma a ion nitrato (NO_3^-) por acción de las bacterias del género *Nitrobacter*. La reacción se expresa de la forma:



Gran parte de la energía exotérmica liberada por las oxidaciones se usa para reducir el dióxido de carbono CO_2 en la formación de materia orgánica. La reacción global del proceso de nitrificación se expresa de la forma:



Parte de la dinámica de los lagos consiste en la reducción de nitrato (NO_3^-) a nitrógeno molecular N_2 . La reacción general de desnitrificación se puede representar de la forma:



Según estudios realizados en regiones tropicales, las concentraciones de nitrógeno de nitrato (NO_3^-) no muestran un patrón definido. Su concentración es menor durante la estratificación térmica que durante el período de circulación. En el epilimnion aislado de las capas inferiores, el nitrógeno de nitrato es asimilado por el fitoplancton; mientras que en el hipolimnion las bajas concentraciones de oxígeno producen una saturación de amoníaco. En regiones amazónicas se han reportado valores promedio de nitrógeno de nitrato de 0.03 mg/L, se han reportado valores igualmente bajos en arroyos de regiones montañosas andinas no perturbadas por acción antropogénica. Los valores de nitrógeno de nitrato en lagos europeos con características de eutrofia oscilan en un rango de 5 a 50 mg/L, ver cuadro 12.

La concentración de nitrógeno de nitritos (NO_2^-) en los lagos es relativamente baja, en comparación con las concentraciones de nitrógeno de amonio (NH_4^+) y nitrógeno de nitrato (NO_3^-). Sólo en lagos contaminados, la concentración de nitrito puede tomar valores significativos. En la región amazónica se han reportado valores promedio de nitrógeno de nitrito (NO_2^-) de 0.001mg/L. Los valores de nitrógeno de nitrito en lagos europeos con características de eutrofia oscilan en un rango de 5 a 15 mg/L, ver cuadro 12 (Roldán & Ramírez, 2008, pp. 247).

El mayor riesgo en la salud de nitrato/nitrito es en los infantes menores a 6 meses de edad. En ésta temprana etapa del desarrollo, el nitrato en el cuerpo es transformado a nitrito, el cuál reacciona con la hemoglobina y evita el transporte de oxígeno al cuerpo y cerebro. Si no se atiende al bebé a tiempo, esta condición puede causarle la muerte. Los adultos tienen un bajo riesgo de padecer éste síndrome. Las mujeres embarazadas o lactantes también deben evitar beber agua con niveles elevados de nitrato/nitrito debido a que los efectos pueden ser trasladados al feto o infante. Ha habido estudios que sugieren que altos niveles de nitrato/nitrito pueden causar ciertos tipos de cáncer, pero esta conexión no está bien establecida (Sinlerm & Bauder, 2000, pp 1-2).

f) Nitrógeno en el lago de Amatitlán

Como se puede observar en la figura 21, hay una tendencia a través del tiempo a que la concentración de nitrógeno total aumente significativamente (Barrientos, M, 2009, pp. 22).

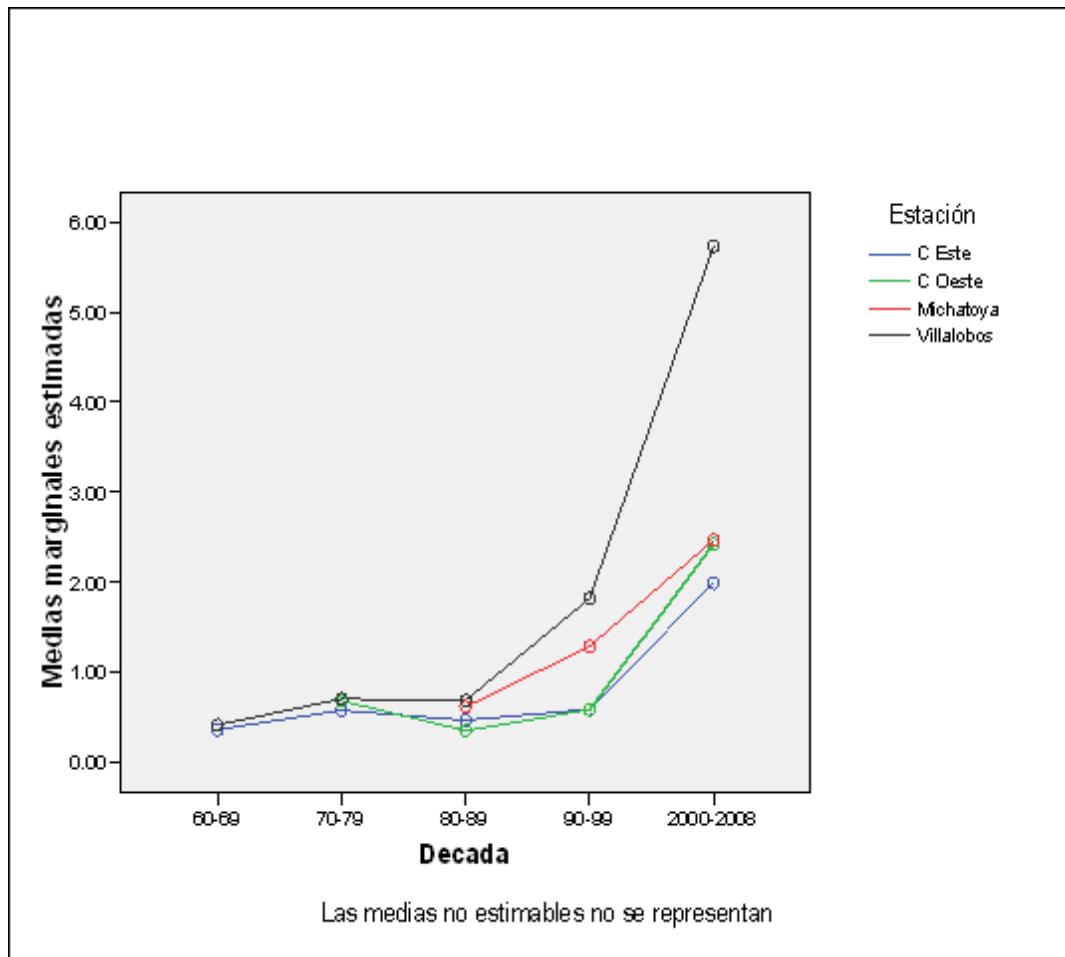


Figura 21: Valores medios de la concentración de nitrógeno total en mg/L durante las décadas 1960 a 1969, 1970 a 1979, 1980 a 1989, 1990 a 1999 y de 2000 a 2008, en diferentes sitios de muestreo del lago de Amatitlán. (Fuente: Barrientos, M. (2009). *Dinámica de algunas características físico-químicas del agua del lago de Amatitlán en el periodo 1968-2008*. Guatemala).

Como puede observarse en el cuadro 13, los promedios de las concentraciones de nitrógeno total de los años del 2009 al 2013 generalmente altos del epilimnion, decaen en el mesolimnion y vuelven a incrementarse en el hipolimnion. La diferencia entre los promedios de las concentraciones de nitrógeno total en el epilimnion y el hipolimnion aumenta en época lluviosa, en relación a la época seca.

Cuadro 13: Promedios anuales de las concentraciones de nitrógeno total medidos en mg/L durante los años 2009 al 2012, en los sitios de muestreo ubicados en el centro este y centro oeste del lago de Amatitlán.

Nitrógeno Total (mg/L)												
	2009			2010			2011			2012		
	E.S ¹	E.LL ₂	P	E.S	E.LL	P	E.S	E.LL	P	E.S	E.LL	P
Este												
E ³	3.3	2.2	2.7	3.5	1.5	2.5	1.9	1.3	1.6	2.2	2.6	2.4
M ⁴	1.6	1.3	1.4	1.7	1.5	1.6	2.0	1.1	1.5	0.9	0.9	0.9
H ⁵	3.3	2.7	3.0	1.8	2.1	1.9	1.8	2.2	2.0	1.4	0.9	1.1
Oeste												
E	2.0	2.2	2.1	3.7	1.7	2.7	2.6	4.1	3.4	1.9	2.6	2.3
M	2.5	2.1	2.3	3.0	2.8	2.9	1.7	4.6	3.0	1.4	1.2	1.3
H	3.2	6.1	4.6	4.1	2.9	3.5	1.8	1.9	1.9	2.0	2.0	2.0

Fuente: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA). Datos de la División de control, calidad ambiental y manejo de lagos.

Notas: Los valores no estimados no se representan en los valores promedios presentados.

¹ Época seca, ² Época lluviosa, ³ Epilimnion, ⁴ Mesolimnion, ⁵ Hipolimnion

Según puede observarse en el cuadro 14, los promedios de las concentraciones de nitrógeno de amonio son mayores en el centro oeste en comparación del centro este del lago de Amatitlán. También es posible apreciar que los promedios de las concentraciones de nitrógeno de amonio aumentan conforme se avanza en la columna de agua.

Cuadro 14: Promedios anuales de las concentraciones de nitrógeno de amonio medidos en mg/L durante los años 2009 al 2012, en los sitios de muestreo ubicados en el centro este y centro oeste del lago de Amatitlán.

Nitrógeno de amonio (mg/L)												
	2009			2010			2011			2012		
	E.S ¹	E.LL ₂	P	E.S	E.LL	P	E.S	E.LL	P	E.S	E.LL	P
Este												
E ³	0.16	0.05	0.11	0.18	0.08	0.13	0.09	0.04	0.07	0.02	0.02	0.02
M ⁴	0.31	0.21	0.26	0.37	0.67	0.52	0.26	0.09	0.18	ND	ND	ND
H ⁵	0.83	1.04	0.93	0.65	0.63	0.64	0.39	0.59	0.49	0.07	0.37	0.22
Oeste												
E	1.00	0.09	0.50	0.67	0.44	0.55	0.43	0.27	0.35	0.25	0.14	0.20
M	1.33	0.54	0.94	0.79	0.40	0.60	0.38	0.44	0.41	0.36	0.39	0.38
H	1.95	2.55	2.25	1.43	1.16	1.29	0.65	0.63	0.64	0.33	1.03	0.68

Fuente: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA). Datos de la División de control, calidad ambiental y manejo de lagos

Notas: Los valores no estimados no se representan en los valores promedios presentados.

¹ Época seca, ² Época lluviosa, ³ Epilimnion, ⁴ Mesolimnion, ⁵ Hipolimnion

Según puede observarse en el cuadro 15, los promedios de las concentraciones de nitrógeno de nitrito son mayores en el centro este en relación con el centro oeste del lago de Amatitlán. Las concentraciones de nitrógeno de nitrito disminuyen conforme se avanza en la columna de agua.

Cuadro 15: Promedios anuales de las concentraciones de nitrógeno de nitrito medidos en mg/L durante los años 2009 al 2012, en los sitios de muestreo ubicados en el centro este y centro oeste del lago de Amatitlán.

Nitrógeno de nitrito (mg/L)												
	2009			2010			2011			2012		
	E.S ¹	E.LL ²	P	E.S	E.LL	P	E.S	E.LL	P	E.S	E.LL	P
Este												
E ³	0.096	0.024	0.060	0.408	0.078	0.243	0.022	0.010	0.016	0.021	0.021	0.021
M ⁴	0.035	0.021	0.028	0.024	0.027	0.026	0.022	0.002	0.012	0.022	0.021	0.021
H ⁵	0.021	0.026	0.023	0.022	0.028	0.025	0.020	0.002	0.011	0.020	0.021	0.021
Oeste												
E	0.049	0.055	0.052	0.140	0.118	0.129	0.022	0.005	0.013	0.021	0.018	0.019
M	0.049	0.037	0.043	0.109	0.113	0.111	0.021	0.002	0.010	0.022	0.019	0.020
H	0.039	0.044	0.041	0.088	0.052	0.070	0.021	0.002	0.012	0.021	0.018	0.020

Fuente: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA). Datos de la División de control, calidad ambiental y manejo de lagos

Notas: Los valores no estimados no se representan en los valores promedios presentados.

¹ Época seca ² Época lluviosa, ³ Epilimnion, ⁴ Mesolimnion, ⁵ Hipolimnion

6. Fósforo

El fósforo es el elemento que desempeña el papel más importante en el metabolismo biológico; es relativamente escaso en la hidrósfera, generalmente actúa como limitante de la productividad biológica. Más del 90% del fósforo presente en el agua de los lagos es de origen orgánico; del total de fósforo orgánico, alrededor del 70% forma parte del material orgánico particulado y el resto se halla en forma de fósforo disuelto o coloidal. La única forma importante de fósforo inorgánico es el fosforo de ortofosfatos (PO_4^{3-}) (Wetzel, R, 1981, pp. 195).

El ingreso de fósforo en un río puede tener orígenes diversos, precipitación, aguas subterráneas, escorrentía, entre otros. La mayor parte del fósforo presente en la precipitación procede del polvo que se desprende de la tierra debido a la erosión del suelo y de la contaminación atmosférica urbana e industrial. En zonas no pobladas el contenido de fósforo de la precipitación es generalmente bajo, inferior a $30\mu\text{g P/L}$, en los alrededores de regiones urbanas e industriales es considerablemente mayor alcanzando valores de 100 mg P/L . El drenaje superficial constituye un contribuyente importante de fósforo a ríos y lagos, las cantidades de fósforo que ingresan por este medio dependen del tipo de suelo, topografía, cobertura vegetal, uso de tierra y polución. Las aguas superficiales de escorrentía reciben gran cantidad de fósforo procedente de aguas residuales domésticas, principalmente de detergentes que contribuyen de forma muy acentuada a la fertilización de aguas dulces (Wetzel, R, 1981, pp. 195). La dinámica del fósforo presente en el epilimnion consiste en su avance hacia los sedimentos en la mayoría de lagos. Existe poca correlación entre la cantidad de fósforo contenido en los sedimentos y la productividad del agua que la cubre. La cantidad de fósforo de los sedimentos puede ser varios órdenes de magnitud superior a la del agua (Wetzel, R, 1981, pp. 196).

a) Fosforo Total:

El fósforo en el agua está presente en diferentes formas, como fósforo inorgánico disuelto o fósforo de ortofosfatos, fósforo orgánico disuelto, fósforo inorgánico particulado y fósforo orgánico particulado. El fósforo particulado incluye: el fósforo presente en los organismos en forma de ácidos nucleicos, fosfatos de nucleótidos, ésteres de bajo peso molecular; fósforo adsorbido a materia orgánica particulada muerta o a agregaciones macroorgánicas; fósforo adsorbido en complejos inorgánicos como arcillas, carbonatos e hidróxido férrico. El fósforo inorgánico disuelto está compuesto: fósforo de ortofosfatos (PO_4^{-3}), polifosfatos procedentes principalmente de detergentes sintéticos, coloides orgánicos o fósforo combinado con coloides adsorbentes. La sumatoria de todas estas formas de fósforo, da como resultado el fósforo total (Fuentes, F; Massol, A, 2002, 2002, pp. 12).

Las concentraciones de fósforo total en aguas superficiales no contaminadas se encuentran en un rango entre 10 a 50 µg/L. Los niveles de fósforo son generalmente más bajos en regiones montañosas y mayores en las aguas de tierras bajas, que derivan de depósitos de rocas sedimentarias. Los lagos ricos en materia orgánica tienden a mostrar concentraciones más altas de fósforo. Vollenweider demostró en 1968 a través de varios criterios que el fósforo total generalmente aumenta con la productividad de los lagos, ver cuadro 16 (Wetzel, R, 1981, pp. 197).

Cuadro no. 16: Relaciones generales entre la productividad de los lagos y las concentraciones medias de fósforo epilimnético total

Productividad del lago	Fósforo Total (mg/L)
Ultra-oligotrófico	< 0.005
Oligo-mesotrófico	0.005 – 0.01
Meso-eutrófico	0.01 – 0.03
Eutrófico	0.03 – 0.1
Hipereutrófico	> 0.1

Fuente: Vollenweider (1968) En: Wetzel, R. (1981). *Limnología*. Barcelona. Ediciones Omega.

b) Fósforo de ortofosfatos

Desde el punto de vista limnológico, la forma de más importante del fósforo es el fósforo de ortofosfatos. Es la forma más soluble y asimilable, la manera en que las plantas acuáticas y fitoplancton son capaces de absorberlo. Los fosfatos son extremadamente reactivos, en condiciones oxidantes pueden interactuar con cationes y formar compuestos solubles que precipitan. La disponibilidad de fósforo de ortofosfatos en el agua aumenta con pH básicos y disminuye en pH ácidos. Lagos con pH básicos tienden a ser más productivos que los ácidos. En los trópicos las altas temperaturas aumentan el metabolismo de las plantas y el fitoplancton, por lo que el fósforo de ortofosfatos se consume más rápidamente. Los valores de fósforo de ortofosfatos tienden a ser bajos, con valores promedio de 0.001 a 0.002

mg/L, salvo en ecosistemas muy intervenidos o eutrofizados (Roldán & Ramírez, 2008, pp. 249-250).

c) Fósforo en el lago de Amatitlán

Como puede observarse en la figura 22, los valores medios de la concentración de fósforo de ortofosfatos ha aumentado considerablemente desde la década de 1980 hasta la actualidad (Barrientos, M, 2009, pp. 22).

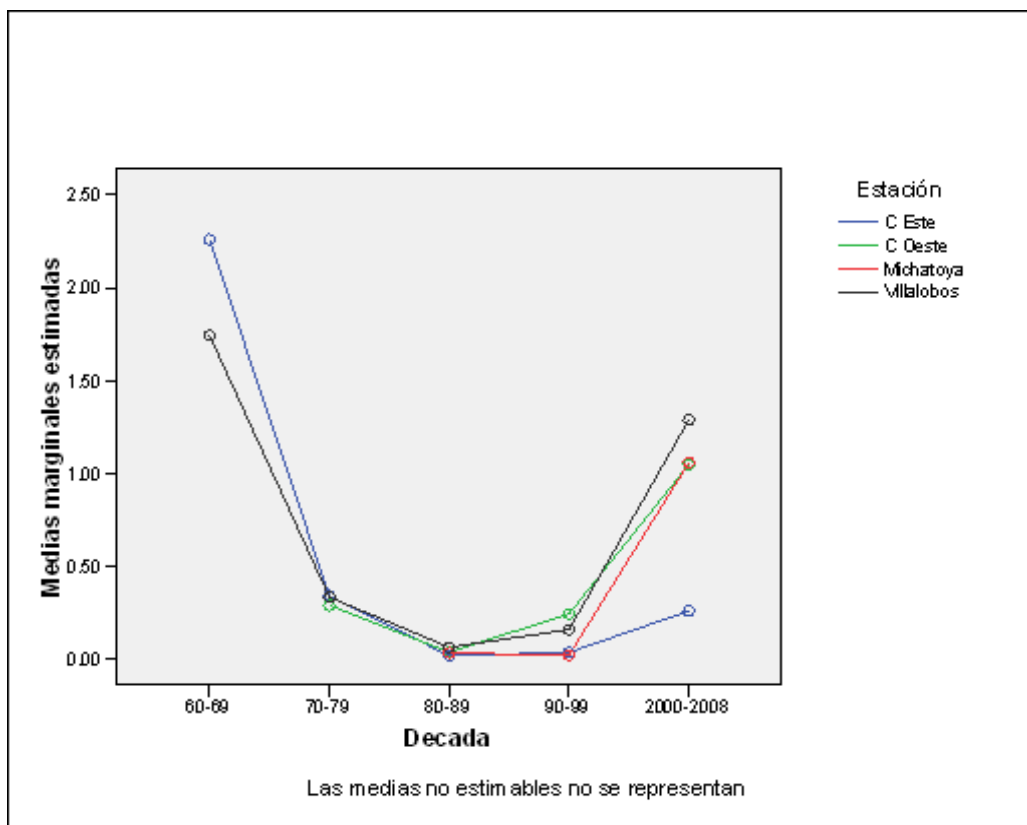


Figura 22: Valores medios de la concentración de nitrógeno total en mg/L durante las décadas 1960 a 1969, 1970 a 1979, 1980 a 1989, 1990 a 1999 y de 2000 a 2008, en diferentes sitios de muestreo del lago de Amatitlán. (Fuente: Barrientos, M. (2009). *Dinámica de algunas características físico-químicas del agua del lago de Amatitlán en el periodo 1968-2008*. Guatemala).

Según puede observarse en el cuadro 17, los valores promedios de las concentraciones de fósforo de ortofosfato son superiores en el centro oeste en relación al centro este del lago de Amatitlán. Se puede apreciar que las concentraciones más altas de fósforo de ortofosfato se registran en el hipolimnion.

Cuadro 17: Promedios anuales de las concentraciones de fósforo de ortofosfatos medidos en mg/L durante los años 2009 al 2012, en los sitios de muestreo ubicados en el centro este y centro oeste del lago de Amatitlán.

Fósforo de ortofosfatos (mg/L)												
	2009			2010			2011			2012		
	E.S ¹	E.LL ²	P	E.S	E.LL	P	E.S	E.LL	P	E.S	E.LL	P
Este												
E ³	0.096	0.044	0.072	0.163	0.116	0.140	0.283	0.140	0.212	0.205	0.152	0.176
M ⁴	0.091	0.040	0.066	0.107	0.130	0.118	0.216	0.169	0.192	0.209	0.154	0.182
H ⁵	0.212	0.317	0.264	0.158	0.172	0.165	0.508	0.285	0.396	0.200	0.141	0.165
Oeste												
E	0.492	0.350	0.415	0.512	0.371	0.441	0.210	0.344	0.277	0.229	0.167	0.198
M	0.507	0.450	0.478	0.387	0.373	0.380	0.222	0.330	0.276	0.206	0.204	0.205
H	0.930	0.655	0.792	0.453	0.580	0.517	0.297	0.421	0.359	0.236	0.228	0.231

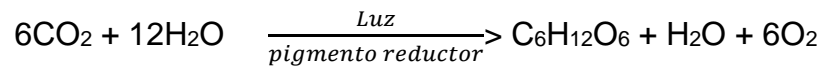
Fuente: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA). Datos de la División de control, calidad ambiental y manejo de lagos

Notas: Los valores no estimados no se representan en los valores promedios presentados.

¹ Época seca, ² Época lluviosa, ³ Epilimnion, ⁴ Mesolimnion, ⁵ Hipolimnion

D. Productividad primaria fitoplanctónica

La producción primaria es una medida que indica la tasa de incorporación de carbono inorgánico durante la fotosíntesis por parte de fitoplancton. Dado que se trata de una tasa, puede definirse como la cantidad de biomasa que se forma en un período determinado, si la biomasa es generada por fotosíntesis. Se representa a través de la ecuación (Wetzel, R, 1981, pp. 289):



La productividad primaria puede dividirse en (Wetzel, R, 1981, pp. 290):

- Productividad primaria bruta (PPB):

Cantidad de biomasa total ganada que incluye las pérdidas ocasionadas principalmente por la respiración durante un período determinado.

- Productividad primaria neta (PPN):

Biomasa menos la pérdida por respiración en un intervalo de tiempo. La productividad primaria de los lagos es fundamentalmente autótrofa, representa la mayor síntesis de materia orgánica en los ecosistemas acuáticos. En lagos grandes se considera como el principal aporte de materia orgánica y energía potencial que rige el sistema. La productividad primaria es útil para determinar los efectos de los contaminantes y nutrientes en la comunidad acuática (Wetzel, R, 1981, pp. 289).

1. Productividad primaria y eutrofización:

Un efecto de la contaminación de origen orgánico es el incremento de la producción primaria en el agua por el aporte de nutrientes, efecto conocido como eutrofización. Este término está asociado a un aumento de la productividad, a una simplificación estructural de los componentes bióticos, y a una disminución de la capacidad del metabolismo de los organismos para adaptarse a los cambios impuestos. En condiciones eutróficas, las tasas de entrada de fósforo y nitrógeno son altas. La productividad sufre un incremento que da como resultado una reducción de la zona eufótica debida a las limitaciones de la luminosidad, ver figura 23. Esta disminución de la profundidad continúa con la intensificación de la eutrofización hasta que las densidades de población planctónica imponen restricciones de luz debidas al efecto de propia sombra. Es aquí donde la tasa de producción planctónica llega a una meseta que evoluciona gradualmente hacia la extinción del espejo de agua (por la continua sedimentación de materia orgánica en descomposición) (Vega & Paz, 2004, pp. 1).

Los lagos pueden clasificarse en base a su nivel de producción primaria en oligotróficos o eutróficos de acuerdo a la baja o alta productividad. La escasez de nutrientes está asociada a aguas oligotróficas, sistemas acuáticos con una mínima producción primaria sobre todo fitoplanctónica. En otro extremo en aguas o sistemas hipereutróficos, se da la generación continua y masiva de biomasa principalmente de fitopláctones, que lleva a propiciar severos problemas en los flujos energéticos (Fuentes, F; Massol, A, 2002, pp.6).

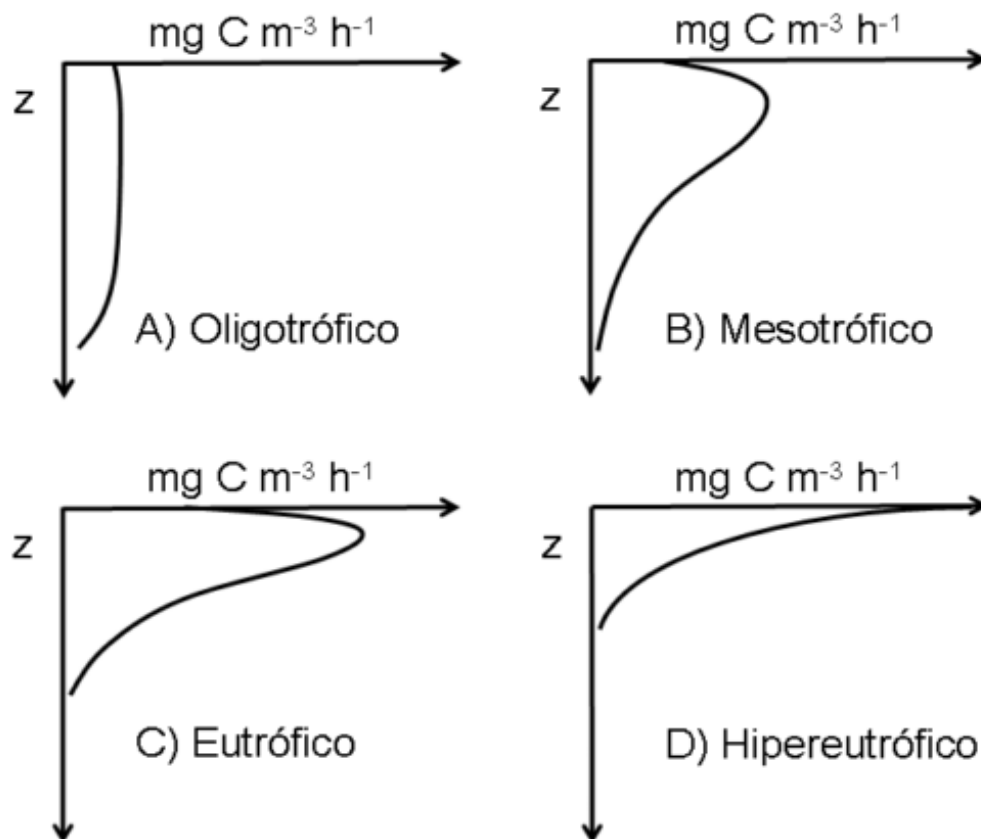


Figura 23: Aumento generalizado de la productividad fitoplanctónica por unidad de volumen de agua en sistemas con diferentes estados tróficos. (Fuente: González, E. (2004). *Estimación de la productividad primaria en un sistema acuático*. Venezuela. Interciencia).

Esta es una distinción importante porque la eutrofización de las aguas es un proceso común de la vida de los lagos de agua dulce, que tienden a cambiar de forma natural de un sistema oligotrófico a uno eutrófico con el paso del tiempo. Si en los afluentes que llegan al lago se descargan aguas residuales, el sedimento recibe todos los contaminantes o casi todos. La masa de agua se eutrofiza y se acelera el proceso de autodestrucción, apareciendo fermentaciones de todo tipo, inicialmente aerobias, aumentando la DBO y por ende impactos sobre la fauna acuática (Vega & Paz, 2004, pp.3, 4).

Con el progresivo incremento de las entradas de nutrientes ha generalizado el interés por conocer el rol de la producción primaria en ecosistemas acuáticos.

Los valores de productividad primaria para un lago con características de eutrofia sobrepasan 1000 miligramos de carbono dentro de metro cuadrado por día (mg C/m²d), ver cuadro 18 (Roldán & Ramírez, 2008, pp. 268).

Cuadro 18: Estado trófico y productividad primaria fitoplanctónica en mg C/m²d

Ultra-oligotrófico	< 40
Oligotrófico	50 – 300
Mesotrófico	250 – 1000
Eutrófico	> 1000

Fuente: Likens 1975 En: González, E. (2004). *Estimación de la productividad primaria en un sistema acuático*. Venezuela. Interciencia.

2. Productividad primaria en lagos con características tropicales:

Existe información numerosa respecto a las tasas de productividad primaria en lagos, lagunas y embalses de características tropicales.

El lago Cacibolca, Nicaragua, presento en los años de 1990 a 1998 una productividad primaria bruta PPB de 500 a 3,100 mg C/m²d. El lago Cacibolca

presenta los promedios de productividad primaria bruta más altos en época seca en comparación a la época lluviosa, con 2.4 y 1.2 mg C/m²d respectivamente. Los valores de productividad primaria entre otros datos limitados de nutrientes, lo ubican como un lago eutrófico (Hooker et al, 2006, pp. 1).

La laguna Larga, Cuba, en los años 2008 al 2009 presentó una productividad primaria neta PPN de 120 ± 70 mg C/m²d en el sector Este de la laguna, y 710 ± 410 mg C/m²d en el Oeste. Según estos datos se clasifica la laguna como oligotrófica en el Este, y mesotrófica en el Oeste (Güimerais & González, 2011, p.3).

El embalse Pao Caniche, Venezuela, presentó en los años 1998 a 1999 una productividad primaria bruta PPB de 1016.2 a 6815.7 mg C/m²d y una productividad primaria neta PPN de 560.2 a 3894.9 mg C/m²d. En base a estos resultados el embalse Pao Caniche se clasifica como hipertrófico (González, et al, 2004, pp. 2).

El embalse de Guri, en Venezuela, presentó en los años 1986 a 1987 una productividad primaria neta PPN de 6 a 26.6 mg C/m²d en una primera estación ubicada cerca de la presa, y 7.5 a 65.3 mg C/m²d en una segunda estación rodeada de tierras agrícolas. Los valores más altos de productividad primaria neta se obtuvieron en época lluviosa. Según estos resultados se concluyó que Guri es un lago oligotrófico, y que su productividad primaria es limitada por los nutrientes y la pobre penetración de luz (Gonzalez, Paolini & Infante, 1991, pp.1).

En los años 1997 a 1999 se estudiaron otros embalses en Venezuela, como la Mariposa (hipereutrófico), que presentó una productividad primaria bruta PPB de 968 a 2633 mg C/m²d. La Pereza (eutrófico), con una productividad primaria bruta de PPB entre 265 a 5619 mg C/m²d. La Quebrada Seca (hipereutrófico), con una productividad primaria bruta de PPB entre 1763 y 3494 mg C/m²d. El Lagartijo (oligotrófico), cuyos valores de productividad primaria bruta variaron entre 376 y 2088 mg C/m²d (González, et al, 2003, pp. 1).

Otros lagos tropicales como la ciénaga Escobillitas, Colombia, poseen regímenes hidráulicos diferentes que incluyen periodos de inundación. En el 2007 presento una productividad primaria bruta PPB que oscilo entre 0 a 191.6 mg C/m²d. El sistema acuático oscila entre ultraoligotrófico y oligotrófico, lo que señala una alta dinámica trófica (Montoya & Aguirre, 2010, pp. 1).

Otro lago con un régimen hidráulico que incluye pulsos de inundación, es el Lago Boa, Colombia. En los años de 1999 al 2000, el lago Boa presento una productividad primaria bruta que PPB que varió de 600 a 2,300 mg C/m²d. El lago Boa fluctúa de condiciones mesotróficas en la época de inundación a un estado eutrófico cuando el sistema se desconecta del río en aguas bajas (Pinilla, 2009, pp.3).

E. Biomasa fitoplanctónica

El fitoplancton es un ensamble de organismos planctónicos en su mayoría fotoautotróficos, adaptados a la suspensión en aguas abiertas de los sistemas de agua cerrados, en la zona pelágica del mar, o en los ríos. Su capacidad de locomoción es restringida, por lo que su distribución se debe principalmente al movimiento pasivo del viento y las corrientes. Comúnmente se presentan en la zona fótica, o bien completan una porción significativa de sus ciclos vitales en dicha zona. El fitoplancton tiene un amplio espectro de formas y tamaños. En sistemas poco productivos, los organismos de menor tamaño (< 5 µm) son más frecuentes y abundantes; mientras que los organismos de mayor tamaño (>20 µm) o microfitoplancton dominan en aguas eutróficas, que corresponden a sistemas más productivos, ricos en fósforo y nitrógeno. Se ha podido establecer relaciones entre las características del cuerpo de agua y su nivel trófico, con el tipo de fitoplancton dominante bajo esas condiciones. En lagos de características tropicales, eutróficos, alcalinos y ricos en nutrientes, predominan las cianofitas, particularmente la *Microcystis*, *Aphanizomenon*, y *Anabaena*. Entre otras algas observadas en este escenario se encuentran las euglenoficeas si el lago está polucionado o es muy rico en materia orgánica (Roldán & Ramírez, 2008, pp. 274).

La biomasa se considera como la materia de origen fitoplanctónico presente en el ecosistema acuático expresada en peso por unidad de área o de volumen, brinda una estimación de la cantidad relativa del total de materia viva de una especie determinada (Roldán & Ramírez, 2008, pp. 275).

La biomasa del ensamble fitoplanctónico puede estimarse utilizando índices que incluyen el peso seco, el peso seco libre de cenizas, el biovolumen, el carbono total y el contenido de clorofila. Generalmente se mide la concentración de clorofila *a*, por ser la más abundante e importante. La concentración de la clorofila varía con las especies y con factores ambientales y nutricionales; los valores de clorofila no guardan proporcionalidad estricta con la biomasa ni con la producción, pues hay varios factores que afectan su expresión final. Valores altos de clorofila no indican necesariamente producción alta, por ello no debe considerarse a la biomasa como equivalente de la producción (Roldán & Ramírez, 2008, pp. 273).

En aguas dulces templadas se observa una periodicidad de la biomasa fitoplanctónica. Durante el período de invierno el crecimiento se ve significativamente reducido. Normalmente el número de fitoplancton y su biomasa aumenta en la primavera, alcanzando un máximo primaveral. En lagos templados el máximo primaveral de biomasa fitoplanctónica generalmente es de corta duración, alrededor de unos tres meses. La caída de máximo primaveral del fitoplancton en lagos templados también está asociado a la reducción de nutrientes en la zona fótica del epilimnion, obligando a disminuir el crecimiento de las poblaciones dominantes. La distribución vertical de biomasa también se ve afectada por la estacionalidad (Wetzel, R, 1981, pp. 291-292).

Cuadro 19. Clasificación de lagos de la Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) de acuerdo al contenido de clorofila *a*

	Oligotróficos	Mesotróficos	Eutróficos
Clorofila <i>a</i> (µg/l)	1.7	4.7	14.3
Valores pico de clorofila <i>a</i> (µg/l)	4.2	16.1	42.6

Fuente: Organization for Economic Cooperation and Development (1982) En: Vega, L. Paz, O. (2004). *Condiciones tróficas de la bahía de Ayagachi del lago Titicaca*. Bolivia. Editorial Universidad mayor de San Andrés.

IV. JUSTIFICACIÓN

El lago de Amatitlán es uno de los sistemas hidrológicos más importantes de Guatemala dada su extensión y su cercanía con la ciudad capital, es utilizado para fines diversos tales como agua para consumo doméstico, hidroelectricidad, navegación comercial, pesca, recreación y turismo. También alberga una gran variedad de flora y fauna, tanto el lago como sus alrededores conforman un espacio físico en donde interactúan gran diversidad de organismos. Con el crecimiento poblacional e industrial de la capital y municipios aledaños sumado a un deficiente control sobre las descargas de aguas residuales domésticas e industriales, residuos sólidos, entre otros, la cuenca y el lago de Amatitlán han sido fuertemente afectadas de manera negativa. Se generó un alto grado de contaminación en las aguas superficiales que drenan hacia el río Villalobos principal afluente del lago de Amatitlán. Los efectos de la contaminación han tenido diferentes manifestaciones en el lago, siendo una de las más importantes la proliferación de fitoplancton y por consiguiente la eutrofización del sistema lacustre.

Debido a la situación de polución alarmante que sufre el lago de Amatitlán en 1996 se creó una institución encargada de la recuperación y resguardo del lago, La Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del lago de Amatitlán (AMSA). A través de la división de Control, Calidad Ambiental y Manejo de Lagos, han realizado desde su creación múltiples esfuerzos para la caracterización del lago de Amatitlán. Se han logrado recabar datos respecto a las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua del lago de y su cuenca. Actualmente no se cuenta con información que refiera el estado trófico del lago de Amatitlán a través de su relación con la productividad primaria.

La estimación de la productividad primaria y biomasa permite evaluar el estado trófico en un sistema acuático. Se buscó realizar una evaluación más completa del estado trófico del lago de Amatitlán, que integrara los datos históricos recabados por la Autoridad del Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA) y otros autores, así como los parámetros a medir de productividad primaria y biomasa. Con esta información se buscó sentar una línea base que responda a las características más recientes del lago de Amatitlán; y pueda ser implementada posteriormente en la labor investigativa.

V. OBJETIVOS

A. Objetivo General

Establecer el estado trófico actual del lago de Amatitlán a través de los parámetros de productividad primaria y biomasa.

B. Objetivos Específicos

1. Describir las diferencias de productividad primaria entre el lado este y el oeste del lago de Amatitlán durante seis muestreos a través del método de evolución de la concentración de oxígeno disuelto en botellas claras y oscuras.
2. Describir las diferencias de biomasa entre el lado este y el oeste del lago de Amatitlán durante seis muestreos a través de la determinación de la clorofila a.
3. Describir las diferencias de productividad primaria entre la época seca y la época lluviosa durante seis muestreos a través del método de evolución de la concentración de oxígeno disuelto en botellas claras y oscuras.
4. Describir las diferencias de biomasa entre la época seca y la época lluviosa durante seis muestreos a través de la determinación de la clorofila a.

VI. HIPÓTESIS

Dada la naturaleza de la investigación, estudio descriptivo de parámetros múltiples, no se plantea hipótesis.

VII. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Universo

El agua del lago de Amatitlán, ubicado en Guatemala

B. Muestra

8 litros de agua colectada a diferentes profundidades, en cada uno de los dos puntos de muestreo para estimación de la biomasa.

8.4 litros de agua colectada a diferentes profundidades, en cada uno de los dos puntos de muestreo para estimación de la productividad primaria.

Un total de 32.8 litros de agua del lago de Amatitlán por muestreo. Tres muestreos en época seca y tres muestreos en época lluviosa.

Los puntos establecidos fueron los siguientes:

	Coordenadas
Centro Oeste	N 14°26'08.1" W 090°33'05.5"
Centro Este	N 14°28'38.1" W 090°35'13.4"

C. Materiales

1. Equipo

Aparato de sistema de posicionamiento global GPS
Balanza Analítica Sartorius modelo 2245/capacidad 220g
Bomba de vacío
Botella de Van Dorn
Boyas de anclaje
Chalecos salvavidas
Centrifugadora
Cinchos de plástico
Cordones
Discos de aluminio
Disco Secchi
Embarcación pequeña para navegación acuática
Equipo espectrofotómetro UV-visible
Estufas con agitación magnética Thermo Scientific modelo SL194325
Frigorífico Thermo Scientific
Hielera mediana Thermo
Papel Filtro Whatman GF/F
Vortex

2. Reactivos

Ácido Salicílico grado reactivo 6g
Ácido clorhídrico concentrado (HCl) grado reactivo 40ml
Ácido Sulfúrico concentrado (H₂SO₄) grado reactivo 300ml
Agua destilada 2 garrafones
Almidón 15g
Azida de Sodio (NaN₃) grado reactivo 4g
Dicromato de potasio (K₂CrO₇) grado reactivo 2g
Etanol (96%) 2L

Hidróxido de Sodio (NaOH) grado reactivo 175g

Ioduro de Potasio (KI) grado reactivo 50g

Sulfato Manganeso monohidratado ($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) grado reactivo 110g

Tiosulfato de sodio pentahidratado ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) grado reactivo 40g

3. Cristalería

1 Agitador de vidrio

1 Agitador magnético

Balón aforado 2 de 50ml, 1 de 250ml, 1 de 500ml y 1 de 1 L

1 Baño de maría

Beakers 5 de 50ml, 2 de 100ml, 2 de 250 ml y 1 de 1 L

2 Botellas de vidrio ámbar de 500 ml

18 Botellas plásticas de polietileno de 1 L

48 Botellas plásticas de polietileno de 350ml

1 Bureta de 50 ml

2 Espátulas

1 Embudo Buchner

1 Kitasato 500ml

6 Matraces Erlenmeyer de 250 ml

1 Pinza para bureta

20 Pipetas plásticas de 1 ml

1 Pizetas

Probetas de 1 de 10ml, 1 de 100, 1 de 250 ml

1 Soporte Universal

1 Termómetro

18 Tubos de ensayo

18 Tubos de plástico con rosca

D. Métodos

1. Diseño de la investigación:

Investigación transversal descriptiva de dos parámetros relacionados al estado trófico de un sistema lacustre, con mediciones efectuadas en época seca y lluviosa; realizando tres muestreos en cada una de las épocas. En cada muestreo se toman en cuenta dos puntos del lago de Amatitlán.

2. Análisis estadístico:

Debido a la naturaleza descriptiva de la investigación que se realizó, se utilizó como parámetro descriptivo: el rango dentro del cual se encuentran las mediciones de cada indicador del estado trófico del sistema lacustre por muestreo. Todas las muestras se trabajaron por duplicado, como medida de tendencia central se utilizaron la media, y como medida de desviación la desviación estándar. Se realizaron 6 muestreos, 3 en época seca y 3 en época lluviosa. Como medida de tendencia central para cada indicador se utilizaron la media, y como medida de desviación para cada indicador se utilizara la desviación estándar. Los resultados obtenidos se presentaran en tablas cada una con sus respectivos descriptores estadísticos mencionados anteriormente.

3. Muestreo:

Debido a la morfología del lago de Amatitlán se consideró que cada una de los segmentos sureste y noroeste se comportan de forma diferente. La Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA) en su labor investigativa y esfuerzo por caracterizar las propiedades fisicoquímicas del lago de Amatitlán, han establecido diferentes puntos de muestreo. En la presente investigación se tomaron en cuenta los puntos centro Este y centro Oeste que se corresponden a las coordenadas anteriormente descritas. Esto con el fin de contar con el registro histórico de los parámetros medidos en el lugar, por considerarse como los puntos más representativos para cada segmento, y por las facilidades para realizar las mediciones de campo conferidas por las boyas de anclaje situadas en

ambos puntos. Se realizaron un total de 6 muestreos, tres en época seca y tres en época lluviosa. Según datos históricos la época seca se considera como los meses comprendidos entre noviembre a abril, y la época lluviosa los meses de mayo a octubre.

4. Procedimiento:

a) Estimación de la productividad primaria

Método: Evolución de la concentración de oxígeno disuelto en botellas claras y oscuras para estimación de la productividad primaria, Wetzel, R.G. & Likens G.E. (2000). *Limnological analyses*. 3rd edition. Springer. New York, USA.

i. Incubación

- Tomar lectura de la transparencia con el disco Secchi
- Tomar las muestras de agua a nivel superficial, y con la botella de Van dorn a una profundidad indicada por la visibilidad de un disco Secchi, la profundidad del doble del valor indicado por la visibilidad del disco Secchi y del triple del valor indicado por la visibilidad del disco Secchi
- Para cada nivel llenar 6 botellas. 4 claras: I (Blanco), C (claras) y 2 oscuras: O (oscuras).
Cuidar que no queden burbujas de aire dentro de las botellas y recordar renovar el volumen de las mismas. Inmediatamente después, protegerlas de la luz (colóquelas en oscuridad).
- Fijar el oxígeno disuelto de la botella "I" por medio del método de Winkler (ver inciso ii).
- Colocar las botellas "C" y "O" en los soportes correspondientes, en cada una de las profundidades correspondientes Se deberá colocar 4 botellas en cada soporte, 2 claras y 2 oscuras.
- Después de haber suspendido en el agua, considere este tiempo como el inicio de la incubación (tiempo = 0).

- Después de cumplido el tiempo de incubación, retire inmediatamente las botellas del agua y fije el oxígeno presente por medio del método de Winkler

ii. Determinación de oxígeno disuelto (OD), por método Winkler:

- Preparar las siguientes soluciones:
 - ✓ Solución de sulfato manganeso: Disolver 364 g de $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (ó 400 g de $\text{MnSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, ó 480 g de $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) en agua destilada. Llevar el volumen hasta un litro con agua destilada.
 - ✓ Solución de yoduro alcalino: Disolver 700 g de KOH y 150 g de KI (ó 500 g de NaOH y 135 g de NaI) en agua destilada. Llevar el volumen hasta un litro con agua destilada.
 - ✓ Ácido sulfúrico concentrado.
 - ✓ Solución de tiosulfato de sodio: Disolver el tiosulfato de sodio en agua destilada hervida. Llevar el volumen hasta un litro con agua destilada. La cantidad de tiosulfato de sodio a disolver dependerá de la concentración deseada:
 - 0.0250 N: 6,2050 g de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
 - 0.0125 N: 3,1025 g de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
 - 0.1000 N: 2,4818 g de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
 - 0.0050 N: 1,2409 g de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
 - ✓ Solución de almidón: Disolver 2,5 g de almidón en poca cantidad de agua destilada fría. Completar el volumen hasta 500 ml con agua destilada hirviendo. Agitar. Filtrar. Conservar con 1 g de ácido salicílico.
 - ✓ Solución de dicromato de potasio 0.1N: Secar el dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) en una estufa a 125°C por una hora. Dejar enfriar (en un desecador) y pesar exactamente 0,4904 g y disolver en agua destilada. Llevar el volumen a un litro con agua destilada. Almacenar la solución en botellas de vidrio bien cerradas y protegidas.

- Estandarizar el tiosulfato de sodio. Para ello, disponer de 25 ml de la solución de dicromato de potasio 0.1N en un matraz erlenmeyer de 250 ml. Luego, añadir 1 ml de yoduro alcalino y 2 ml de HCl y agitar. Titular con la solución de tiosulfato de sodio y calcular el factor de estandarización del tiosulfato.

$$F = 0,08 \times 25 / B$$

Donde:

F= Factor de estandarización del tiosulfato de sodio.

B= Volumen de tiosulfato gastado en la titulación del dicromato de potasio.

- En las botellas en donde se encuentran las muestras de agua añadir 1 ml de sulfato de manganeso y 1 ml de yoduro de potasio (se introduce la pipeta justo por debajo de la superficie de la muestra). Se tapa la botella y se agita vigorosamente.
- Dejar que se forme un precipitado. Agitar nuevamente. Dejar que el precipitado sedimente por lo menos hasta 1/3 de la altura de la botella.
- Agregar 1 ml de ácido sulfúrico concentrado introduciendo la pipeta justo por debajo de la superficie de la muestra. Tapar la botella y se agitar vigorosamente hasta que el precipitado se disuelva.
- Tomar 100 ml de muestra, transferirlo a un matraz erlenmeyer de 250 ml de capacidad. Titular con tiosulfato de sodio, hasta que aparezca un color amarillo claro. Se añaden varias gotas de solución de almidón y se mezcla hasta producir un color azul uniforme. Se continúa la titulación hasta que el color azul desaparezca.
- Se estima la concentración de oxígeno disuelto por medio de la ecuación:

$$\text{mg O}_2/\text{l} = 1000 \times B \times F / A$$

B = Volumen de tiosulfato de sodio gastado en la titulación

F = Factor de estandarización del tiosulfato de sodio

A = Volumen de muestra utilizado

iii. Cálculos para la estimación de la productividad primaria:

El principio del método se basa en que, durante la incubación de las muestras del fitoplancton, se debería esperar que la concentración inicial de oxígeno disuelto (botella inicial, "I") disminuyera a una menor concentración en la botella oscura ("O") debido a la respiración. Inversamente, la concentración inicial ("I") debería cambiar (usualmente aumentaría) a otra concentración en la botella clara ("C") como resultado de la diferencia entre la producción fotosintética y el consumo respiratorio de oxígeno:

$I - O =$ Actividad respiratoria por unidad de volumen por intervalo de tiempo (R).

$C - I =$ Actividad fotosintética neta por unidad de volumen por intervalo de tiempo (PPN)

$(C - I) + (I - O) = C - O =$ Actividad fotosintética bruta (PPB)

Es recomendable expresar los cambios en la concentración de oxígeno en términos de carbono, ya que este elemento representa tanto la materia inicial como el producto final de la síntesis de materia orgánica y de la respiración. Para convertir de la masa de oxígeno a la masa de carbono, los valores de productividad y consumo de oxígeno deben ser multiplicados por la proporción de moles de carbono / moles de oxígeno ($12 \text{ mg C} / 32 \text{ mg O}_2 = 0,375$).

Entonces:

$$PPB = (C - O) (1000) (0.375) / t$$

$$PPN = (C - I) (1000) (0.375) / t$$

$$R = (I - O) (1000) (0.375) / t$$

Los resultados quedarán expresados en miligramos de carbono fijados por unidad de volumen por intervalo de tiempo: $\text{mg C/m}^3\text{h}$

Para estimar la tasa de productividad fotosintética a lo largo de la columna de agua en la zona eufótica, bajo un metro cuadrado de superficie de agua, los valores de $\text{mg C/m}^3\text{h}$ se grafican con la profundidad. El área bajo la curva se debe integrar, los resultados quedan así expresados en $\text{mg C/m}^2\text{h}$.

Finalmente, los valores obtenidos durante el período de incubación ($\text{mg C/m}^2\text{h}$) deben ser extrapolados a valores diarios. Para ello, se deben multiplicar los valores en miligramos de carbono por metro cuadrado por hora por el número de horas de incubación, para así obtener la productividad durante el período de incubación.

Empleando el registro diario de radiación solar, se integrará el área bajo la curva que corresponde al período de incubación, y luego se integrará el área total bajo la curva del fotoperiodo, para finalmente expresar los datos en $\text{mg C/m}^2\text{día}$. Al final, este procedimiento puede visualizarse de una manera muy simplificada como una regla de tres, que permitirá obtener la productividad expresada en términos diarios: En el período de incubación (“Y”% del área bajo de la curva) $\rightarrow \text{mg C/m}^2\text{h}$
Entonces en el 100% del fotoperiodo se obtendrán $\rightarrow \text{“X” mg C/m}^2\text{día}$
Las operaciones de integración se realizaron a través del programa digital Qtiplot en su versión 0.9.8.9.

b) Estimación de la biomasa fitoplanctonica a través de la detección de la clorofila a

Método: Determinación de la clorofila a, por método de Nusch, E. A & Palme, G. (1975)

i. Almacenamiento de la Muestra:

La clorofila debe de analizarse de inmediato debido a su rápida degradación. De no ser analizada de inmediato se recomienda filtrar la muestra al momento de la recepción y congelar los filtros en sobres de papel aluminio por no más de un mes.

ii. Determinación de la clorofila a (Nusch & Palme, 1975)

Consiste en la extracción de los pigmentos de la clorofila a con etanol caliente al 96%. Se determina la densidad óptica (absorbancia) del extracto en un espectrofotómetro a una longitud de onda de 665 nm. Se utiliza la lectura de absorbancia a 750 nm como corrección de la turbidez.

- Todo trabajo con pigmentos fotosintéticos debe de ser efectuado con luz tenue o en oscuridad y en el menor tiempo posible para evitar su degradación.
- Preparar una disolución de ácido clorhídrico 0,4 M
- Con ayuda de la bomba de vacío se filtra 1L de muestra (o el volumen que pueda filtrarse) utilizando filtros de fibra de vidrio GF/F 47mm. Luego, con ayuda pinzas, se coloca el filtro doblado por la mitad dentro de un tubo de centrifuga plástico
- A cada tubo con filtro se agregan 10ml de etanol al 96%, se tapan. Se recomienda hacer cada muestra por duplicado y contar con dos blancos que se describen a continuación:
 - ✓ Blanco con etanol al 96%: se debe de agregar 10ml de etanol al 96% al tubo plástico (sin filtro).
 - ✓ Blanco con papel filtro sin muestra: se coloca en un tubo plástico un filtro nuevo (sin filtrar) doblado por la mitad.
- Los tubos de plástico se calientan en un baño Maria a 75°C por 5 minutos. Luego, se enfrían con hielo, hasta que alcancen la temperatura ambiente y se mezclan durante 20 segundos utilizando un Vortex.
- El papel filtro debe ser extraído del tubo luego de la mezcla, teniendo la precaución de no derramar demasiado extracto.
- Los tubos con el extracto (sin filtros) se centrifugan a 3000 rpm por 10 minutos.
- Con una pipeta, se toma todo el extracto que sea posible (evitando tomar el precipitado) y se trasvasa a tubos de ensayo previamente identificados.
- El extracto trasvasado se coloca en una cubeta de cuarzo y se mide la absorbancia a 750nm y a 665nm de longitud de onda. A 750nm se determina la turbidez de la muestra y así poder corregir la absorbancia de la clorofila-a a los 665nm. Incorporar también la medición de la absorbancia de los blancos mencionados.

- Para determinar la feofitina y así poder hacer la corrección necesaria, se agregan 30µl de HCl 0,4 M en tubos de ensayo previamente identificados; luego se agregan 3ml de cada extracto y se mezclan durante 10 segundos en un Vortex. Después de un período de 5 – 30 minutos, se determina la absorbancia a 775 y a 665nm de longitud de onda. El pH del extracto debe estar, luego de la acidificación, entre 2.6 y 2.8.

iii. Cálculos para la estimación de la clorofila a

Clorofila a ($\mu\text{g/l}$) $29.6 ((A_{665} - A_{750}) - (A_{a665} - A_{a750})) V_e/V_m L$

Feofitina = $20.8 (A_{a665} - A_{a750}) V_e/V_m L - \text{clo-a}$

A_{665} = absorbancia del extracto original a 665nm.

A_{750} = absorbancia del extracto original a 750nm

A_{a665} = absorbancia a 665nm después de acidificar

A_{a750} = absorbancia a 750nm después de acidificar

V_e = volumen de etanol utilizado para la extracción (10ml)

V_m = volumen de agua filtrada (1L).

L = longitud del paso de luz en la cubeta del espectrofotómetro (1 cm).

Los datos de la concentración de clorofila-a y de feofitina se expresan en $\mu\text{g/L}$ (equivalente en mg/m^3).

iv. Cálculo de índices

Coeficiente de asimilación de carbono: PPN/B

Se calcula dividiendo la productividad primaria neta (PPN), expresada en $\text{mg C/m}^2\text{día}$, dentro de la concentración de clorofila a (biomasa = B), expresada en $\text{mg clorofila-a/m}^2$. Los valores se expresan como: $\text{mg C/mg clorofila-a}^*\text{día}$

VIII. RESULTADOS

Cuadro 20: Clorofila a y feofitina expresada en mg/m^3 , productividad primaria bruta (PPB), respiración (R) y productividad primaria neta (PPN) expresadas en $\text{mg C/m}^3\text{h}$; medidas realizadas a diferentes profundidades indicadas por la medición de transparencia por medio de un Disco Secchi (DS), en los sitios de muestreo ubicados en el centro este y centro oeste del lago de Amatitlán; durante marzo del 2014 a enero del 2015. Se presenta una columna que contiene los valores promediados de las muestras de clorofila a tomadas por duplicado a diferentes profundidades (X), así como su respectiva desviación estándar (SD).

DS	Clorofila a	Feofitina	X	SD	PPB	R	PPN
	mg/m^3	mg/m^3	mg/m^3	mg/m^3	$\text{mg C/m}^3\text{h}$	$\text{mg C/m}^3\text{h}$	$\text{mg C/m}^3\text{h}$
Centro Este							
Marzo 2014							
0	59.67	9.30	61.27	2.26	734.7	400.8	334.0
	62.87	9.68					
1	79.03	3.86	90.06	15.59	486.6	105.0	381.7
	101.08	20.39					
2	62.16	25.70	62.16	0.00	592.6	417.7	174.9
	ND ¹	ND ¹					

3	70.21	15.24	68.02	3.10	573.2	48.6	524.6
	65.83	13.13					
Mayo 2014							
0	32.93	7.58	30.93	2.83	910.4	877.1	33.3
	28.93	5.65					
1	33.66	4.61	38.90	7.42	1,054.8	921.5	133.2
	44.15	3.52					
2	36.45	4.08	29.90	9.27	1,099.2	732.8	366.4
	23.34	6.61					
3	38.82	0.23	38.82	0.00	1,154.7	344.2	810.5
	ND ²	ND ²					
Julio 2014							
0	38.18	36.75	47.25	12.82	302.6	273.8	28.8
	56.31	71.50					
1	46.97	34.36	49.19	3.14	482.1	482.1	0.0
	51.41	32.83					
2	93.63	36.71	70.45	32.79	371.9	192.9	179.1
	47.26	34.48					
3	55.80	25.12	53.98	2.56	ND ³	ND ³	ND ³
	52.17	18.29					

Septiembre 2014							
0	46.32	NDe ⁴	48.91	3.66	116.3	9.7	106.6
	51.50	NDe ⁵					
1	47.36	NDe ⁶	47.14	0.31	242.2	116.3	126.0
	46.92	NDe ⁷					
2	48.99	NDe ⁸	51.58	5.34	225.6	147.8	77.8
	56.54	NDe ⁹					
3	46.62	NDe ¹⁰	42.48	5.86	256.7	171.2	85.6
	38.33	NDe ¹¹					
Noviembre 2014							
0	56.00	26.95	48.54	10.55	ND ¹²	ND ¹²	ND ¹²
	41.08	25.23					
1	201.67	57.08	218.25	23.44	72.0	40.0	32.0
	234.83	59.70					
2	129.35	37.15	138.45	12.87	40.0	4.0	36.0
	147.56	23.94					
3	92.50	14.52	97.09	6.49	8.0	4.0	4.0
	101.68	1.60					

Enero 2015							
0	18.94	56.44	19.00	0.08	176.5	108.3	68.2
	19.06	49.99					
1	52.69	3.26	47.95	6.70	28.1	4.0	24.1
	43.22	20.12					
2	45.44	13.53	46.47	1.47	76.2	16.0	60.2
	47.51	3.04					
3	45.14	8.11	49.95	6.80	40.1	8.0	32.1
	54.76	8.47					
TOTAL			X = 62.36 SD = 41.38		X = 411.11 SD = 372.79	X = 246.63 SD = 285.14	X = 164.50 SD = 202.77
Centro Oeste							
Marzo 2014							
0	53.87	71.86	108.78	77.65	834.6	666.7	167.9
	163.69	26.84					
1	89.39	25.70	89.39	0.00	717.6	417.3	300.3
	ND ¹³	ND ¹³					
2	185.10	34.69	190.33	7.40	570.0	452.9	117.0
	195.56	33.38					
3	205.82	34.77	256.14	71.16	763.4	473.3	290.1
	306.46	49.50					

Mayo 2014							
0	40.34	9.22	58.90	26.25	283.5	196.6	86.9
	77.47	13.10					
1	48.46	8.47	47.53	1.32	315.3	96.6	218.7
	46.60	10.45					
2	49.14	9.10	61.82	17.94	203.4	76.3	127.1
	74.51	13.74					
3	89.05	15.60	77.81	15.91	152.6	86.5	66.1
	66.56	10.58					
Julio 2014							
0	71.28	12.17	70.86	0.59	267.2	14.8	252.3
	70.45	23.73					
1	52.92	2.57	51.86	1.51	202.8	168.2	34.6
	50.79	NDe ¹⁴					
2	44.64	3.45	42.21	3.43	148.4	123.7	24.7
	39.78	NDe ¹⁵					
3	55.17	7.97	57.25	2.93	232.5	207.8	24.7
	59.32	13.56					

Septiembre 2014							
0	384.50	NDe ¹⁶	326.49	82.05	581.4	415.3	166.1
	268.47	NDe ¹⁷					
1	259.30	NDe ¹⁸	259.59	0.42	265.8	171.7	94.1
	259.89	NDe ¹⁹					
2	230.09	NDe ²⁰	231.67	2.23	193.8	188.3	5.5
	233.25	NDe ²¹					
3	180.76	NDe ²²	168.33	17.58	182.7	144.0	38.8
	155.89	NDe ²³					
Noviembre 2014							
0	179.18	131.02	162.41	23.72	181.7	159.0	22.7
	145.63	111.04					
1	262.45	111.95	241.63	29.44	307.2	150.3	156.9
	220.82	88.27					
2	182.93	88.17	252.98	99.07	24.0	2.2	21.8
	323.03	91.30					
3	858.99	210.96	689.24	240.07	104.6	69.7	34.9

Enero 2015							
0	60.50	59.22	57.90	3.68	16.0	14.0	2.0
	55.29	52.87					
1	56.98	55.03	61.64	6.59	40.1	38.1	2.0
	66.30	34.58					
2	63.94	27.50	58.25	8.04	52.1	14.0	38.1
	52.57	40.12					
3	46.53	40.75	51.03	6.36	38.1	30.1	8.0
	55.53	46.89					
TOTAL			X = 153.09 SD = 144.54		X = 278.28 SD = 239.40	X = 182.39 SD = 175.85	X = 95.89 SD = 94.15

Fuente: Datos experimentales

Nota: ^{1,2,13} No disponible, debido al alto grado de degradación de la muestra estos valores no fueron incluidos. ^{3, 12} No disponible, debido a errores experimentales estos valores no fueron incluidos. ^{4,5,6,7,8,9,10,11,14,15,16,17,19,20,21,22,23} No detectable

Cuadro 21: Transparencia medida en metros por medio de disco Secchi, clorofila *a* expresada en mg/m², productividad primaria bruta (PPB), respiración (R), productividad primaria neta (PPN) expresadas en mg C/m²d y el coeficiente de asimilación de carbono (PPN/B) expresado en mg C/mg clorofila-*a**d; medidas realizadas en los sitios de muestreo ubicados en el centro este y centro oeste del lago de Amatitlán; durante marzo del 2014 a enero del 2015.

	Transparencia	Clorofila a	PPB	R	PPN	PPN/B
Unidad	M	mg/m ²	mg C/m ² d	mg C/m ² d	mg C/m ² d	mg C/mg clorofila- <i>a</i> *d
Centro Este						
Marzo 2014	0.5	108.43	7,198.3	3,104.2	4,094.8	37.8
Mayo 2014	0.7	72.57	11,603.4	8,247.5	3,355.5	46.2
Julio 2014	0.9	153.23	6,016.1 ¹	5,253.2 ¹	763.3 ¹	5.0
Septiembre 2014	0.8	115.53	9,893.6	5,361.1	4,534.8	39.3
Noviembre 2014	0.6	257.71	375.1 ²	121.9 ²	253.2 ²	1.0

Enero 2015	1.0	128.90	1,665.7	612.3	1,053.4	8.2
Promedio época seca	0.7	165.01	3,079.7	1,279.5	1,800.5	15.6
Desviación Estándar	0.3	80.93	3,624.7	1,599.2	1,929.3	20.0
Promedio época lluviosa	0.8	113.78	9,171.0	6,287.3	2,884.5	30.2
Desviación Estándar	0.1	40.36	2,862.9	1,698.5	1,929.3	22.1
Promedio anual	0.8	139.40	6,125.4	3,783.4	2,342.5	22.9
Desviación Estándar	0.2	63.71	4,434.5	3,114.5	1,866.7	20.3

Centro Oeste						
Marzo 2014	0.4	184.87	6,488.2	4,478.2	2,009.6	10.9
Mayo 2014	0.5	88.85	4,653.8	1,986.3	2,667.5	30.0
Julio 2014	0.4	63.25	1,931.4	1,295.6	635.6	10.0
Septiembre 2014	0.4	2,95.47	3,659.2	2,780.9	878.4	3.0
Noviembre 2014	0.6	552.26	2,249.9	1,265.7	984.2	1.8
Enero 2015	0.7	122.05	661.0	411.0	250.0	2.0
Promedio época seca	0.6	286.39	3,133.0	2,051.6	1,081.3	4.9
Desviación Estándar	0.2	232.38	3,012.3	2,144.5	883.8	5.2
Promedio época lluviosa	0.4	149.19	3,414.8	2,020.9	1,393.8	14.3

Desviación Estándar	0.1	127.33	1,377.6	743.3	1,109.7	14.0
Promedio anual	0.5	217.79	3,273.9	2,036.3	1,237.6	9.6
Desviación Estándar	0.1	183.66	2,100.6	1,435.5	913.4	10.8

Fuente: Datos experimentales

Nota: ¹ Los valores reportados no corresponden a la integración completa de la columna de agua, debido a errores experimentales no fue posible incluir los valores tomados a una profundidad de 3 discos secchi. ² Los valores reportados no corresponden a la integración completa de la columna de agua, debido a errores experimentales no fue posible incluir los valores tomados a nivel superficial.

IX. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A. Transparencia

1. Centro este

En el centro este la transparencia varió de 0.5 a 1.0m, reportándose un promedio anual de $0.8\text{m} \pm 0.2$, siendo mayor en época lluviosa en relación a la época seca. La amplitud de la zona fótica varió de 1.35 a 2.7 m según la relación de 2,7 veces la transparencia de Secchi (Poole y Atkins, 1929).

Según las medidas de transparencia, el centro este del lago de Amatitlán se comporta como un cuerpo de agua eutrófico la mayor parte del año (ver cuadro de resultados 1, ver cuadro 4). Esto coincide con los registros históricos de los últimos años (ver cuadro 5).

2. Centro oeste

En el centro oeste la transparencia varió de 0.4 a 0.7m, reportándose un promedio anual de $0.5\text{m} \pm 0.1$, siendo mayor en época seca en relación a la época lluviosa. Según datos recopilados durante el estudio de batimetría realizado en el lago de Amatitlán en el año 2012 (WESA-ASEBASTE, 2012), el lado oeste ha sido severamente impactado por el arrastre de sedimentos que transporta el río Villalobos, cuya tasa de sedimentación aumenta durante la época lluviosa y en un evento climático extremo. El aumento de arrastre de sedimentos durante la época lluviosa puede incidir en una disminución en las medidas de transparencia en el centro oeste. La amplitud de la zona fótica varió de 1.08 a 1.89 en el centro oeste, según la relación de 2,7 veces la transparencia de Secchi (Poole y Atkins, 1929).

Los valores de las medidas de transparencia clasifican el centro oeste del lago de Amatitlán como un cuerpo de agua eutrófico (ver cuadro de resultados 1, ver cuadro 4). Esto coincide con los registros históricos de los últimos años (ver cuadro 5).

B. Biomasa de fitoplancton

1. Centro este

En el centro este la biomasa de fitoplancton (estimada con la concentración de clorofila *a*) varió de 72.5 a 257.71 mg/m², el valor máximo de biomasa se registró en el mes de noviembre del 2014. Se reportó un incremento en la biomasa en época seca en relación a la época lluviosa. El incremento de biomasa en época seca coincide con la disminución de la transparencia en el mismo periodo.

En términos volumétricos el valor promedio de clorofila *a* en el centro este fue de 62.36 mg/m³. Para un lago eutrófico se espera un valor promedio de 14.3 mg/m³ y valores pico de 42.6 mg/m³. Según esto el centro este del lago de Amatitlán respondería a características de hipereutrofia (ver cuadro de resultados 2, ver cuadro 19). Los valores de las concentraciones de clorofila *a* del mes de septiembre en el centro este podrían estar sobreestimados. Se considera acidificación de las muestras fue incompleta, por lo que la clorofila *a* presente en las muestras no se degradó por completo en feofitina. Lo que se refleja en los valores de feofitina obtenidos en el mes de septiembre, que no son detectables.

En el centro este la biomasa de fitoplancton (estimada con la concentración de clorofila *a*), no muestra mayores sesgos a lo largo de la columna de agua. Salvo para los meses de marzo y noviembre del 2014, donde hay un claro incremento de biomasa de fitoplancton a una profundidad de un disco secchi.

2. Centro oeste

En el centro oeste la biomasa de fitoplancton (estimada con la concentración de clorofila *a*) varió de 63.25 a 552.26 mg/m², el valor máximo de biomasa se registró en el mes de noviembre del 2014. Se reportó un incremento en la biomasa en época seca en relación a la época lluviosa. El incremento de la biomasa en época seca no coincide con una disminución en la transparencia en el mismo periodo, en relación al resto del año. El arrastre de sólidos suspendidos en época lluviosa es relevante en el centro oeste, lo que pudo haber incidido en la medición de transparencia.

En términos volumétricos el valor promedio de clorofila *a* en el centro oeste fue de 153.09 mg/m³, un poco más del doble de los valores registrados en el centro este. Para un lago eutrófico se espera un valor promedio de 14.3 mg/m³ y valores pico de 42.6 mg/m³. Según esto el centro oeste del lago de Amatitlán respondería a características de hipereutrofia, aún más críticas que en el centro este del lago (ver cuadro de resultados 2, ver cuadro 19). Los valores de las concentraciones de clorofila *a* del mes de septiembre en el centro oeste podrían estar sobreestimados. Se considera acidificación de las muestras fue incompleta, por lo que la clorofila *a* presente en las muestras no se degradó por completo en feofitina. Lo que se refleja en los valores de feofitina obtenidos en el mes de septiembre, que no son detectables.

En el centro oeste se puede observar un leve aumento de la biomasa de fitoplancton (estimada con la concentración de clorofila *a*), a una profundidad de tres discos secchi en los meses de marzo, mayo, julio y noviembre del 2014. En los meses de marzo y noviembre del 2014 la concentración de biomasa de fitoplancton (estimada con la concentración de clorofila *a*) a tres discos secchi de profundidad es considerablemente superior a la biomasa de fitoplancton a nivel superficial y en el resto de la columna de agua.

Las concentraciones de biomasa de fitoplancton (estimada con la concentración de clorofila *a*), son superiores la mayor parte del año en el centro oeste en relación al centro este. Hay mayor disposición de especies de fósforo y nitrógeno en el centro oeste en relación al centro este, según indican registros históricos (ver cuadros 13, 14, 15, 17 y figuras 21 y 22). Se puede observar la relación entre el aumento de nutrientes en el centro oeste con el aumento de la biomasa en el mismo sector.

El centro este y el oeste del lago presentan comportamientos similares en relación a las concentraciones de biomasa (estimada con la concentración de clorofila *a*), a lo largo del año según puede observarse en la figura de resultados no.1 y no.15.

Las concentraciones más altas de biomasa de fitoplancton fueron registradas en el mes de noviembre del 2014, coincidiendo esta tendencia en ambos centros este y oeste.

C. Productividad Primaria

1. Centro este

En el centro este el valor máximo de productividad primaria bruta se registró en el mes de mayo del 2014 y fue de 11,603.4 mg C/m²d de los cuales 8,247.5 mg C/m²d se deben a la respiración. El valor mínimo de productividad primaria bruta se registró en el mes de noviembre del 2014 y fue de 375.1 mg C/m²d; sin embargo, este valor podría estar subestimado debido a que por errores de tipo experimental no fue posible establecer la productividad primaria a nivel superficial, por lo que la integración fue incompleta. Los mayores valores de producción primaria bruta generalmente se registraron a nivel superficial, a una profundidad de 1 disco secchi.

El mes con el valor más alto de productividad primaria neta fue septiembre del 2014, con un valor de 4,534.8 mg C/m²d. El valor mínimo de productividad primaria neta se registró en el mes de noviembre del 2014 con un valor de 253.2 mg C/m²d; sin embargo, este valor puede estar nuevamente subestimado, debido a errores de tipo experimental por los que no fue posible establecer la productividad primaria a nivel superficial, y por consiguiente realizar una integración completa.

Los valores de productividad primaria bruta del centro este del lago de Amatitlán integrados y expresados en unidades de área y en términos diarios, se consideran elevados. Lagos como Cacibolca, Nicaragua (Eutrófico), presento en los años de 1990 a 1998 una productividad primaria bruta PPB de 500 a 3,100 mg C/m²d (Hooker e,t al, 2006); el embalse Pao Caniche, Venezuela (hipereutrófico), presento en los años 1998 a 1999 una productividad primaria bruta PPB de 1016.2 a 6815.7 mg C/m²d (González, et al, 2003). De acuerdo a la clasificación de lagos por estado trófico y productividad primaria fitoplanctónica (Likens 1975), el centro este del lago de Amatitlán presenta características de un lago hipereutrófico. Según registros

históricos de los años del 2009 al 2012, las concentraciones de nutrientes nitrógeno y fósforo (ver cuadros 13, 14, 15 y 17), corresponden a las características de un cuerpo de agua eutrófico (ver cuadros 11, 12 y 16). Los perfiles de las concentraciones de oxígeno disuelto del año 2013 realizados en el centro este del lago de Amatitlán, muestran un hipolimnion anóxico la mayor parte de año, y escasamente oxigenado en los meses de enero, febrero y marzo (ver figura 17 y 18). Perfiles clinógrados son característicos de cuerpos de agua eutróficos (Roldán & Ramírez, 2008, pp.188). Los resultados de la estimación de productividad primaria en el centro este del lago de Amatitlán se corresponden con los registros históricos recientes de las concentraciones de nutrientes en el lago de Amatitlán.

En el centro este los valores promediados de productividad primaria bruta y productividad primaria neta son mayores en época lluviosa en comparación a la época seca. Sin embargo es importante notar que uno de los valores más altos de productividad primaria bruta y productividad primaria neta se registró en el mes de marzo del 2014. El periodo más productivo del centro este del lago de Amatitlán en el año 2014 podría estar comprendido entre los meses de marzo a septiembre, por lo que la separación por época seca y lluviosa no describiría apropiadamente esta dinámica. Las tendencias de productividad primaria bruta y productividad primaria neta parecieran no corresponderse con las concentraciones de biomasa (estimada a través de la clorofila *a*). Los valores de clorofila no guardan proporcionalidad estricta con la biomasa ni con la producción, pues hay varios factores que afectan su expresión final. Valores altos de clorofila no indican necesariamente producción alta, por ello no debe considerarse a la biomasa como equivalente de la producción (Roldán & Ramírez, 2008, pp. 273). Sin embargo, en el mes de julio y noviembre del 2014, debido a errores de tipo experimental no fue posible realizar la integración completa de los valores de productividad primaria en toda la columna de agua. Razón por la cual la productividad primaria bruta y la productividad primaria neta reportada en esos meses podría estar subestimada y como consecuencia no mostrar aparente correlación con las concentraciones de biomasa.

En ecosistemas eficientes y poco intervenidos antropogénicamente, las pérdidas de carbono por respiración no son superiores al 10% del total de carbono asimilado (Gonzalez, 2004, pp.10). Las pérdidas de carbono por respiración en el centro este son superiores al 10%. El Coeficiente de asimilación es un indicativo de la eficiencia del sistema para asimilar carbono en el proceso fotosintético a expensas de la masa autótrófica (Kalff 2002), a mayores valores de este coeficiente más eficientes serán los autótrofos en fijar carbono. Los valores más altos de este coeficiente se presentaron en los meses de marzo, mayo y septiembre del 2014, siendo los meses de actividad productiva más eficiente para el centro este. Se considera el centro este del lago de Amatitlán como un ecosistema poco eficiente que pierde una parte importante del carbono fijado en los procesos de respiración, y cuya capacidad para asimilar el carbono en forma de biomasa es limitada.

2. Centro oeste

En el centro oeste el valor máximo de productividad primaria bruta se registró en el mes de marzo del 2014 y fue de 6,488.2 mg C/m²d de los cuales 4,478.2 mg C/m²d se deben a la respiración. El valor mínimo de productividad primaria bruta se registró en el mes de enero del 2015 y fue de 661.0 mg C/m²d de los cuales 411.0 mg C/m²d se deben a la respiración. Los mayores valores de producción primaria bruta generalmente se registraron a nivel superficial, a una profundidad de 1 disco secchi.

El mes con el valor más alto de productividad primaria neta fue mayo del 2014, con un valor de 2,667.5 mg C/m²d. El valor mínimo de productividad primaria neta se registró en el mes de enero del 2015 con un valor de 250.0 mg C/m²d.

Los valores de productividad primaria bruta del centro oeste del lago de Amatitlán integrados y expresados en unidades de área y en términos diarios, se consideran elevados. En comparación de otros lagos de características tropicales (Hooker et al, 2006), (González, et al, 2003), y conforme a la clasificación de lagos por estado trófico y productividad primaria fitoplanctónica (Likens 1975), el centro oeste del lago de Amatitlán presenta características de un lago hipereutrófico. Según registros

históricos de los años del 2009 al 2012, las concentraciones de nutrientes nitrógeno y fósforo (ver cuadros 13, 14, 15 y 17), corresponden a las características de un cuerpo de agua eutrófico (ver cuadros 11, 12 y 16). Los perfiles de las concentraciones de oxígeno disuelto del año 2013 realizados en el centro oeste del lago de Amatitlán, muestran un hipolimnion anóxico de forma permanente (ver figura 19 y 20). Perfiles clinógrados son característicos de cuerpos de agua eutróficos (Roldán & Ramírez, 2008, pp.188). Los resultados de la estimación de productividad primaria en el centro oeste del lago de Amatitlán se corresponden con los registros históricos recientes de las concentraciones de nutrientes en el lago de Amatitlán.

En el centro oeste los valores promediados de productividad primaria bruta y productividad primaria neta son mayores en época lluviosa en comparación a la época seca. Sin embargo, es importante notar que el valor más alto de productividad primaria bruta y el segundo pico más alto de productividad primaria neta se registraron en el mes de marzo del 2014. Al igual que el centro este del lago de Amatitlán, el periodo más productivo del centro oeste en el año 2014 podría estar comprendido entre los meses de marzo a septiembre, por lo que la separación por época seca y lluviosa no describiría apropiadamente esta dinámica. La productividad primaria bruta y productividad primaria neta se corresponden con las concentraciones de biomasa (estimada a través de la clorofila *a*), salvo para el mes de noviembre del 2014 en donde se registra un aumento de biomasa en relación al mes septiembre del 2014, más no una aumento en la productividad primaria bruta y productividad primaria neta de ese mes. Valores altos de clorofila no necesariamente indican producción alta, por ello no debe considerarse a la biomasa como equivalente de la producción (Roldán & Ramírez, 2008, pp. 273).

Al igual que en el centro este las pérdidas de carbono por respiración en el centro oeste son superiores al 10%. El valor más alto del coeficiente de asimilación se presentó en el mes de mayo del 2014, siguiéndole los meses de marzo y julio del 2014. Se considera que los meses de marzo a julio corresponden al periodo de

actividad productiva más eficiente para el centro oeste. Los valores del coeficiente de asimilación del centro oeste son menores a los que presento el centro este. Se considera el centro oeste del lago de Amatitlán como un ecosistema menos eficiente que el centro este, que pierde una parte importante del carbono fijado en los procesos de respiración, y cuya capacidad para asimilar el carbono en forma de biomasa es limitada.

El centro oeste del lago de Amatitlán presenta un promedio anual de productividad primaria bruta y productividad primaria neta menor al centro este. A pesar de que las concentraciones de biomasa de fitoplancton (estimada a través de la clorofila *a*) son mayores en el centro oeste en relación al centro este, no implica necesariamente que el centro oeste del lago sea el sector más productivo, valores altos de clorofila no necesariamente indican producción alta (Roldán & Ramírez, 2008, pp. 273). En condiciones de hipertrofia, las densidades de población planctónica imponen restricciones de luz debidas al efecto de propia sombra, lo que provoca que la tasa de producción primaria llegue a una meseta que evoluciona gradualmente hacia la extinción del espejo de agua (Vega & Paz, 2004, pp. 1). El centro oeste del lago de Amatitlán presenta concentraciones más altas de biomasa de fitoplancton, pero es menos productivo y tiene una menor eficiencia productiva en relación al centro este del lago.

X. CONCLUSIONES

1. El lago de Amatitlán es un cuerpo de agua que se clasifica como hipereutrófico, según los datos de transparencia, clorofila a y productividad primaria recabados de marzo del 2014 a enero del 2015, lo cual coincide con registros históricos.
2. El lago de Amatitlán es un cuerpo de agua de baja eficiencia productiva, que pierde una parte importante del carbono fijado en los procesos de respiración, y cuya capacidad para asimilar el carbono en forma de biomasa es limitada.
3. Los valores más altos de productividad primaria en el lago de Amatitlán fueron registrados entre los meses de marzo a septiembre del 2014.
4. El centro este del lago de Amatitlán presenta un promedio anual de productividad primaria bruta y productividad primaria neta mayor al centro oeste del lago.
5. El centro oeste del lago de Amatitlán presenta concentraciones más altas de biomasa de fitoplancton, pero con tasas de productividad primaria menores y con una capacidad de incorporar carbono en forma de biomasa más limitada en relación al centro este del lago.
6. En el centro este del lago de Amatitlán es posible observar la relación de aumento de las concentraciones de biomasa de fitoplancton con la disminución de la transparencia en el mismo periodo.
7. En el centro oeste del lago de Amatitlán es posible observar una relación entre el aumento de las concentraciones de biomasa de fitoplancton con un aumento de la productividad primaria.

8. En el centro oeste del lago de Amatitlán el arrastre de sedimentos es relevante, lo que dificulta observar la relación de aumento de biomasa y disminución de la transparencia.

XI. RECOMENDACIONES

1. Realizar un ensayo comparativo de la estimación de la productividad primaria, midiendo el oxígeno disuelto por método de Winkler y con sonda en el lago de Amatitlán.
2. Considerar estudios posteriores de productividad primaria en el lago de Amatitlán, utilizando una sonda para la determinación del oxígeno disuelto.
3. Realizar un mayor número de muestreos en los estudios posteriores de productividad primaria en el lago de Amatitlán, con el fin de comprender de mejor forma las dinámicas estacionales.
4. Considerar realizar estudios posteriores en el lago de Amatitlán que integren datos de productividad primaria y biomasa fitoplanctónica, con diversidad y abundancia de fitoplancton.
5. Establecer un programa de monitoreo permanente de la productividad primaria y biomasa del lago de Amatitlán, el cual deberá incluir idealmente mediciones mensuales, con el fin de generar un registro de datos actualizados respecto al estado trófico del cuerpo de agua.

XII. BIBLIOGRAFÍA

1. Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán AMSA (2012). *Actualización del Plan de Manejo Integrado de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (PLANDEAMAT)*. Guatemala: Presidencia de la República.
2. Autoridad para el Manejo de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA), División de control, calidad ambiental y manejo de lagos. (2013). *Informe Diciembre del 2013*.
3. Autoridad Para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA). (2013). *Lago de Amatitlán, Folleto Nivel Superior*. Guatemala: Presidencia de la Republica.
4. Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA) e Ingeniería del Agua (INCLAM). (2014). *Plan de Control de la Contaminación del lago de Amatitlán y del río Villalobos*. Guatemala.
5. Barrientos, M. (2009). *Dinámica de algunas características físico-químicas del agua del lago de Amatitlán en el periodo 1968-2008*. Guatemala.
6. Crosara, A. (2007). *Erosión*. Uruguay. Universidad de la República de Uruguay.
7. Fuentes, F; Massol, A. (2002). *Manual de laboratorio ecología de microorganismos: Oxígeno disuelto*. Puerto Rico. Editorial Universidad de Puerto Rico Recinto de Mayagüez.

8. Fuentes, F; Massol, A. (2002). *Manual de laboratorio ecología de microorganismos: Productividad primaria en habitats acuáticos*. Puerto Rico. Editorial Universidad de Puerto Rico Recinto de Mayagüez.
9. Fuentes, F; Massol, A. (2002). *Manual de laboratorio ecología de microorganismos: Temperatura*. Puerto Rico. Editorial Universidad de Puerto Rico Recinto de Mayagüez.
10. González, E. (2004). *Estimación de la productividad primaria en un sistema acuático*. Venezuela. Interciencia.
11. González, E; Ortaz, M; Peñaherrera, C & Matos, M. (2004). Fitoplancton de un embalse tropical hipereutrófico (Pao-Cachinche, Venezuela): Abundancia, biomasa y producción primaria. *Interciencia*. N° 29, pp. 548-555.
12. González, E; Ortaz, M; Peñaherrera, C & Montes, E. (2003). Fitoplancton de cinco embalses de Venezuela con diferentes estados tróficos. *Limnetica* N° 22, pp 15 - 35.
13. Gonzalez, E; Paolini, J & Infante, A. (1991). Water chemistry, physical features and primary production of phytoplankton in a tropical blackwater reservoir (Embalse de Guri, Venezuela). *Verh Internat Verein Limnol*. N° 25, pp 1477 – 1481.
14. Güimarais, M; González, R. (2011). Productividad primaria en laguna larga, Cayo Coco, Cuba. *Revista de ciencias marinas y costeras* Vol. 3, pp. 31-41.
15. Hooker, E; Chow-Wong, N; Rivas, K; Erikson, R; Ahlgren, I & Ahlgren, G. (2006). *Producción primaria y estimación del rendimiento potencial pesquero en el lago Cacibolca, Nicaragua*. Nicaragua. Universidad Centroamericana Nicaragua.

16. Montoya, Y; Aguirre, N. (2010). Dinámica de la producción primaria fitoplanctónica en un lago tropical (ciénaga Escobillitas) a lo largo del pulso de inundación. *Revista de la Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia* N.º 55 pp. 76-89.
17. Pérez, D. (2007). *Evaluación del efecto de la aireación artificial para mejorar la calidad del agua en el lago de Amatitlán*. (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala
18. Pinilla, A. (2009). Producción primaria en un lago de aguas claras de la amazonía colombiana (lago boa). *Acta Biológica Colombiana* Vol. 14, pp. 21-30.
19. Roldán, G; Ramírez, J. (2008). *Fundamentos de limnología neotropical*. Colombia. Universidad de Antioquia.
20. Vega, L; Paz, O. (2004). *Condiciones tróficas de la bahía de Ayagachi del lago Titicaca*. Bolivia. Editorial Instituto de ingeniería sanitaria y ambiental, Universidad mayor de San Andrés.
21. Salas, H; Martinó, P. (2001). *Metodologías simplificadas para la evaluación de eutroficación en lagos cálidos tropicales*. Programa Refioval CEPIS/HPE/IOPS.
22. Sigler, A; Bauder, J. (2000). *Nitrato y Nitrito*. Universidad Estatal de Montana Programa de Extención en Calidad del Agua.
23. Suárez, L; Vidal, R. (2008). *Ecología de aguas continentales: Lección 5. España*. Universidad de Murcia.

- 24.** WESA-ASABATE. (2012). *Estudio de batimetría del lago de Amatitlán y transporte de sedimentos del río Villalobos. Guatemala.* Presidencia de la República.
- 25.** Wetzel, R. (1981). *Limnología.* Barcelona. Ediciones Omega.

XIII. ANEXOS

Cuadro 22: Lecturas de absorción a 665nm, 750nm, y a 665 y 750nm en condiciones ácidas, medidas en un espectrofotómetro para la estimación de Clorofila a y feofitina. Realizadas a diferentes profundidades indicadas por la medición de transparencia por medio de un Disco Secchi (DS), en los sitios de muestreo ubicados en el centro este y centro oeste del lago de Amatitlán durante marzo del 2014 a enero del 2015. Se presenta una columna que contiene los valores promediados (X) de las lecturas de absorción a 665nm, 750nm, y a 665 y 750nm en condiciones ácidas tomadas por duplicado, así como su respectiva desviación estándar (SD)

	DS	Vol. Filtrado	Abs a 665	X	SD	Abs a 750	X	SD	Abs a 665 Ácido	X	SD	Abs a 750 Ácido	X	SD
Unidad		L	Nm			Nm			Nm			Nm		
Centro Este														
Marzo 2014														
	0	0.250	0.1343	0.1380	0.0052	0.0010	0.0012	0.0002	0.0852	0.0867	0.0021	0.0023	0.0017	0.0009
		0.250	0.1416			0.0013			0.0882			0.0010		
	1	0.200	0.1347	0.1612	0.0375	0.0016	0.0021	0.0007	0.0814	0.1005	0.0270	0.0017	0.0023	0.0008
		0.200	0.1877			0.0026			0.1196			0.0028		
	2	0.250	0.1618	0.1618	-	0.0037	0.0037	-	0.1109	0.1109	-	0.0053	0.0053	-
		ND ¹	ND ¹			ND ¹			ND ¹					
	3	0.250	0.1635	0.1573	0.0088	0.0015	0.0011	0.0006	0.1046	0.1005	0.0058	0.0019	0.0017	0.0003
		0.250	0.1511			0.0006			0.0964			0.0015		
Mayo 2014														
	0	0.400	0.1250	0.1162	0.0124	0.0026	0.0022	0.0006	0.0794	0.0736	0.0083	0.0015	0.0014	0.0002
		0.400	0.1074			0.0018			0.0677			0.0012		

	1	0.350	0.1057	0.1201	0.0203	0.0015	0.0018	0.0004	0.0662	0.0740	0.0110	0.0018	0.0017	0.0001
		0.350	0.1344			0.0020			0.0818			0.0016		
	2	0.350	0.1129	0.0968	0.0228	0.0016	0.0021	0.0007	0.0696	0.0605	0.0129	0.0014	0.0012	0.0003
		0.350	0.0806			0.0026			0.0514			0.0010		
	3	0.350	0.1131	0.1131	-	0.0015	0.0015	-	0.0657	0.0657	-	NDe ²	-	-
		ND ³	ND ³			ND ³			ND ³			NDe ³		
Julio 2014														
	0	0.400	0.1984	0.2615	0.0892	0.0027	0.0027	0.0001	0.1441	0.1950	0.0719	NDe ⁴	-	-
		0.400	0.3245			0.0026			0.2458			NDe ⁵		
	1	0.300	0.1665	0.1709	0.0062	0.0016	0.0017	0.0001	0.1173	0.1194	0.0030	NDe ⁶	-	-
		0.300	0.1753			0.0017			0.1215			NDe ⁷		
	2	0.300	0.2843	0.2269	0.0812	0.0014	0.0025	0.0016	0.1880	0.1535	0.0488	NDe ⁸	-	-
		0.300	0.1694			0.0036			0.1190			NDe ⁹		
	3	0.400	0.2332	0.2208	0.0176	0.0022	0.0023	0.0001	0.1556	0.1456	0.0142	NDe ¹⁰	-	-
		0.400	0.2083			0.0023			0.1355			NDe ¹¹		
Septiembre 2014														
	0	0.200	0.0684	0.0702	0.0025	NDe ¹²	-	-	0.0371	0.0372	0.0001	NDe ¹³	-	-
		0.200	0.0720			NDe ¹⁴			0.0372			NDe ¹⁵		
	1	0.200	0.0637	0.0630	0.0011	NDe ¹⁶	-	-	0.0317	0.0311	0.0008	NDe ¹⁷	-	-
		0.200	0.0622			NDe ¹⁸			0.0305			NDe ¹⁹		
	2	0.200	0.0691	0.0722	0.0044	NDe ²⁰	-	-	0.0360	0.0366	0.0008	NDe ²¹	-	-
		0.200	0.0753			NDe ²²			0.0371			NDe ²³		
	3	0.200	0.0690	0.0601	0.0127	0.0014	0.0014	-	0.0361	0.0307	0.0077	NDe ²⁴	-	-
		0.200	0.0511			NDe ²⁵			0.0252			NDe ²⁶		
Noviembre 2014														
	0	0.250	0.1487	0.1340	0.0209	0.0017	0.0033	0.0022	0.1034	0.0958	0.0107	0.0037	0.0061	0.0034
		0.250	0.1192			0.0048			0.0882			0.0085		
	1	0.150	0.2935	0.3142	0.0293	0.0047	0.0041	0.0008	0.1949	0.2073	0.0175	0.0083	0.0078	0.0008
		0.150	0.3349			0.0035			0.2196			0.0072		

	2	0.200	0.2493	0.2587	0.0132	0.0018	0.0026	0.0011	0.1668	0.1697	0.0041	0.0067	0.0072	0.0007
		0.200	0.2680			0.0034			0.1726			0.0077		
	3	0.200	0.1742	0.1738	0.0006	0.0088	0.0071	0.0024	0.1129	0.1125	0.0006	0.0100	0.0114	0.0019
		0.200	0.1734			0.0054			0.1120			0.0127		
Enero 2015														
	0	0.250	0.1110	0.1059	0.0072	0.0044	0.0031	0.0019	0.0967	0.0919	0.0068	0.0061	0.0051	0.0014
		0.250	0.1008			0.0017			0.0871			0.0041		
	1	0.200	0.1074	0.1003	0.0101	0.0180	0.0105	0.0106	0.0769	0.0714	0.0078	0.0231	0.0141	0.0128
		0.200	0.0931			0.0030			0.0659			0.0050		
	2	0.200	0.0897	0.0862	0.0050	0.0023	0.0021	0.0003	0.0593	0.0564	0.0041	0.0026	0.0038	0.0016
		0.200	0.0826			0.0019			0.0535			0.0049		
	3	0.200	0.0840	0.0949	0.0153	0.0023	0.0051	0.0040	0.0558	0.0607	0.0069	0.0046	0.0047	0.0001
		0.200	0.1057			0.0079			0.0655			0.0047		
Centro Oeste														
Marzo 2014														
	0	0.200	0.1585	0.2278	0.0980	0.0012	0.0023	0.0015	0.1232	0.1546	0.0443	0.0023	0.0025	0.0003
		0.200	0.2971			0.0033			0.1859			0.0027		
	1	0.150	0.1292	0.1292	-	0.0009	0.0009	-	0.0868	0.0868	-	0.0038	0.0038	-
		ND ²⁷	ND ²⁷			ND ²⁷			ND ²⁷			ND ²⁷		
	2	0.150	0.2546	0.2601	0.0077	0.0023	0.0018	0.0007	0.1606	0.1636	0.0042	0.0021	0.0018	0.0005
		0.150	0.2655			0.0013			0.1665			0.0014		
	3	0.150	0.2788	0.3463	0.0955	0.0010	0.0014	0.0006	0.1753	0.2171	0.0590	0.0018	0.0020	0.0002
		0.150	0.4138			0.0018			0.2588			0.0021		
Mayo 2014														
	0	0.350	0.1439	0.2024	0.0827	0.0128	0.0148	0.0028	0.0859	0.1206	0.0490	0.0025	0.0027	0.0002
		0.350	0.2608			0.0168			0.1552			0.0028		
	1	0.350	0.1643	0.1589	0.0076	0.0112	0.0068	0.0062	0.0972	0.0979	0.0009	0.0014	0.0020	0.0008
		0.350	0.1535			0.0024			0.0985			0.0025		

	2	0.350	0.1579	0.1987	0.0576	0.0018	0.0023	0.0007	0.1002	0.1255	0.0357	0.0022	0.0022	0.0000
		0.350	0.2394			0.0028			0.1507			0.0022		
	3	0.350	0.2841	0.2473	0.0520	0.0027	0.0024	0.0005	0.1784	0.1558	0.0320	0.0023	0.0028	0.0007
		0.350	0.2105			0.0020			0.1331			0.0033		
Julio 2014														
	0	0.250	0.1803	0.1772	0.0044	0.0198	0.0106	0.0130	0.1128	0.1130	0.0003	0.0125	0.0125	-
		0.250	0.1741			0.0014			0.1132			NDe ²⁸		
	1	0.250	0.1163	0.1104	0.0084	0.0049	0.0029	0.0029	0.0667	0.0637	0.0042	NDe ²⁹	-	-
		0.250	0.1044			0.0008			0.0607			NDe ³⁰		
	2	0.250	0.0966	0.0897	0.0098	0.0011	0.0016	0.0007	0.0578	0.0525	0.0076	NDe ³¹	-	-
		0.250	0.0828			0.0021			0.0471			NDe ³²		
	3	0.250	0.1253	0.1405	0.0214	0.0028	0.0104	0.0107	0.0814	0.0845	0.0044	0.0055	0.0055	-
		0.250	0.1556			0.0179			0.0876			NDe ³³		
Septiembre 2014														
	0	0.100	0.2767	0.2341	0.0603	NDe ³⁴	-	-	0.1468	0.1238	0.0326	NDe ³⁵	-	-
		0.100	0.1914			NDe ³⁶			0.1007			NDe ³⁷		
	1	0.150	0.2708	0.2737	0.0041	NDe ³⁸	-	-	0.1394	0.1422	0.0039	NDe ³⁹	-	-
		0.150	0.2766			NDe ⁴⁰			0.1449			NDe ⁴¹		
	2	0.150	0.2547	0.2547	0.0001	NDe ⁴²	0.0004	-	0.1381	0.1371	0.0015	NDe ⁴³	-	-
		0.150	0.2546			0.0004			0.1360			NDe ⁴⁴		
	3	0.150	0.1863	0.1795	0.0096	NDe ⁴⁵	-	-	0.1000	0.0969	0.0045	0.0053	0.0053	-
		0.150	0.1727			NDe ⁴⁶			0.0937			NDe ⁴⁷		
Noviembre 2014														
	0	0.150	0.3179	0.2904	0.0389	0.0034	0.0037	0.0004	0.2295	0.2108	0.0265	0.0058	0.0064	0.0008
		0.150	0.2629			0.0040			0.1920			0.0069		
	1	0.150	0.4079	0.3770	0.0437	0.0049	0.0081	0.0045	0.2764	0.2545	0.0310	0.0064	0.0080	0.0023
		0.150	0.3461			0.0113			0.2325			0.0096		
	2	0.150	0.2953	0.3844	0.1259	0.0071	0.0090	0.0027	0.2011	0.2552	0.0765	0.0056	0.0081	0.0035
		0.150	0.4734			0.0109			0.3093			0.0105		

	3	0.100	0.8155	0.6627	0.2161	0.0109	0.0073	0.0052	0.5240	0.4292	0.1341	0.0096	0.0066	0.0042
		0.100	0.5099			0.0036			0.3344			0.0036		
Enero 2015														
	0	0.250	0.2009	0.1908	0.0144	0.0059	0.0049	0.0014	0.1487	0.1424	0.0089	0.0048	0.0055	0.0009
		0.250	0.1806			0.0039			0.1361			0.0061		
	1	0.200	0.1513	0.1491	0.0031	0.0051	0.0051	0.0000	0.1148	0.1103	0.0064	0.0071	0.0080	0.0012
		0.200	0.1469			0.0051			0.1058			0.0088		
	2	0.250	0.1669	0.1632	0.0052	0.0030	0.0034	0.0005	0.1171	0.1177	0.0008	0.0072	0.0070	0.0003
		0.250	0.1595			0.0037			0.1182			0.0068		
	3	0.250	0.1485	0.1646	0.0227	0.0043	0.0075	0.0045	0.1112	0.1241	0.0182	0.0063	0.0101	0.0053
		0.250	0.1806			0.0106			0.1369			0.0138		

Fuente: Datos experimentales

Nota: ^{1,3,27} No disponible, debido a errores experimentales estos valores no fueron incluidos. ^{2,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47} No detectable, los valores reportados se encuentran por debajo del límite de detección del equipo.

Cuadro 23: Volumen de tiosulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) expresado en ml, gastado en las titulaciones para la estimación de oxígeno disuelto por el método de Winkler; medidas realizadas a diferentes profundidades indicadas por la medición de transparencia por medio de un Disco Secchi (DS), en los sitios de muestreo ubicados en el centro este y centro oeste del lago de Amatitlán, durante marzo del 2014 a enero del 2015. Se presenta una columna que contiene los valores promediados (X) de los volúmenes de tiosulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) gastado en las titulaciones, tomado por duplicado a diferentes profundidades, así como su respectiva desviación estándar (SD).

DS		Volumen de Tiosulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)	X	SD
		MI		
Centro Este				
Marzo 2014				
0	Estandarización	19.6	19.7	0.1
	Estandarización	19.7		
	Blanco	12.5	11.3	1.7
	Blanco	10.1		
	no oscurecida	12.9	13.1	0.2
	no oscurecida	13.2		
1	Oscurecida	7.3	9.2	2.7
	Oscurecida	11.1		
	Blanco	10.2	10.3	0.1
	Blanco	10.3		
	no oscurecida	12.5	12.3	0.4
	no oscurecida	12.0		
	oscurecida	9.9	9.7	0.3
	oscurecida	9.5		
Estandarización	19.3	19.3	0.0	
Estandarización	19.3			

2	Blanco	10.6	11.3	0.9
	Blanco	11.9		
	no oscurecida	11.2	12.2	1.3
	no oscurecida	13.1		
	Oscurecida	9.3	9.1	0.3
	Oscurecida	8.9		
3	Blanco	9.3	9.1	0.3
	Blanco	8.9		
	no oscurecida	13.3	11.8	2.1
	no oscurecida	10.3		
	Oscurecida	9.8	8.9	1.3
	Oscurecida	7.9		
Mayo 2014				
0	Blanco	9.0	9.0	0.0
	Blanco	9.0		
	no oscurecida	9.5	9.2	0.5
	no oscurecida	8.8		
	Oscurecida	6.0	5.1	1.3
	Oscurecida	4.1		
1	Blanco	6.8	8.3	2.1
	Blanco	9.8		
	no oscurecida	9.4	8.9	0.7
	no oscurecida	8.4		
	Oscurecida	4.0	4.2	0.2
	Oscurecida	4.3		
2	Blanco	10.8	9.0	2.6
	Blanco	7.1		
	no oscurecida	11.3	10.6	1.0
	no oscurecida	9.9		

	Oscurecida	4.2		
	Oscurecida	7.1	5.7	2.1
3	Blanco	4.5		
	Blanco	7.3	5.9	2.0
	no oscurecida	12.5		
	no oscurecida	6.6	9.6	4.2
	Oscurecida	6.5		
	Oscurecida	2.2	4.4	3.0
Julio 2014				
	Estandarización	17.3		
	Estandarización	17.4	17.4	0.1
0	Blanco	13.2		
	Blanco	13.8	13.5	0.4
	no oscurecida	13.8		
	no oscurecida	13.4	13.6	0.3
	Oscurecida	12.9		
	Oscurecida	12.2	12.6	0.5
	Estandarización	18.3		
	Estandarización	18.0	18.2	0.2
1	Blanco	12.9		
	Blanco	13.4	13.2	0.4
	no oscurecida	13.2		
	no oscurecida	13.1	13.2	0.1
	Oscurecida	11.6		
	Oscurecida	11.2	11.4	0.3
2	Blanco	12.0		
	Blanco	13.0	12.5	0.7
	no oscurecida	12.8		
	no oscurecida	13.5	13.2	0.5

	Oscurecida	11.5		
	Oscurecida	12.1	11.8	0.4
3	Blanco	14.7		
	Blanco	15.6	15.2	0.6
	no oscurecida	10.1		
	no oscurecida	10.6	10.4	0.4
	Oscurecida	9.4		
	Oscurecida	9.3	9.4	0.1
Septiembre 2014				
	Estandarización	19.3		
	Estandarización	19.4	19.4	0.1
0	Blanco	5.8		
	Blanco	5.7	5.8	0.1
	no oscurecida	6.0		
	no oscurecida	6.6	6.3	0.4
	Oscurecida	5.2		
	Oscurecida	6.2	5.7	0.7
1	Blanco	5.4		
	Blanco	4.0	4.7	1.0
	no oscurecida	5.0		
	no oscurecida	5.7	5.4	0.5
	Oscurecida	3.8		
	Oscurecida	4.4	4.1	0.4
	Estandarización	24.2		
		24.0	24.1	0.1
2	Blanco	7.4		
	Blanco	6.0	6.7	1.0
	no oscurecida	6.9		
	no oscurecida	7.5	7.2	0.4

	Oscurecida	4.4		
	Oscurecida	7.1	5.8	1.9
3	Blanco	7.5		
	Blanco	7.3	7.4	0.1
	no oscurecida	7.6		
	no oscurecida	8.3	8.0	0.5
	Oscurecida	5.8		
	Oscurecida	6.8	6.3	0.7
Noviembre 2014				
	Estandarización	46.8		
	Estandarización	46.7	46.8	0.1
0	Blanco	11.5		
	Blanco	6.1	8.8	3.8
	no oscurecida	No disponible ¹	-	-
	no oscurecida	No disponible ²		
	Oscurecida	No disponible ³	-	-
	Oscurecida	No disponible ⁴		
	Estandarización	47.1		
	Estandarización	46.7	46.9	0.3
1	Blanco	9.6		
	Blanco	11.2	10.4	1.1
	no oscurecida	8.3		
	no oscurecida	13.3	10.8	3.5
	Oscurecida	8.7		
	Oscurecida	11.1	9.9	1.7
2	Blanco	9.8		
	Blanco	11.2	10.5	1.0
	no oscurecida	8.7		
	no oscurecida	13.2	11.0	3.2

	Oscurecida	9.6		
	Oscurecida	11.3	10.5	1.2
	Estandarización	46.8		
	Estandarización	46.7	46.8	0.1
3	Blanco	8.2		
	Blanco	9.5	8.9	0.9
	no oscurecida	8.3		
	no oscurecida	9.5	8.9	0.8
	Oscurecida	10.2		
	Oscurecida	7.4	8.8	2.0
Enero 2015				
0	Blanco	6.4		
	Blanco	8.2	7.3	1.3
	no oscurecida	6.2		
	no oscurecida	10.1	8.2	2.8
	Oscurecida	6.3		
	Oscurecida	5.6	6.0	0.5
1	Blanco	4.2		
	Blanco	4.7	4.5	0.4
	no oscurecida	5.1		
	no oscurecida	4.4	4.8	0.5
	Oscurecida	5.0		
	Oscurecida	3.8	4.4	0.8
2	Blanco	7.1		
	Blanco	5.0	6.1	1.5
	no oscurecida	6.1		
	no oscurecida	7.5	6.8	1.0
	Oscurecida	6.7		
	Oscurecida	5.0	5.9	1.2

3	Blanco	5.2	6.0	1.1
	Blanco	6.7		
	no oscurecida	6.5	6.4	0.2
	no oscurecida	6.2		
	Oscurecida	5.9	5.9	0.1
	Oscurecida	5.8		
Centro Este				
Marzo 2014				
	Estandarización	19.6	19.7	0.1
	Estandarización	19.7		
0	Blanco	16.2	15.7	0.8
	Blanco	15.1		
	no oscurecida	17.6	17.3	0.4
	no oscurecida	17.0		
	Oscurecida	9.8	9.1	1.0
	Oscurecida	8.4		
1	Blanco	16.0	16.2	0.2
	Blanco	16.3		
	no oscurecida	22.3	19.1	4.5
	no oscurecida	15.9		
	Oscurecida	13.0	12.1	1.3
	Oscurecida	11.1		
2	Blanco	13.1	13.0	0.1
	Blanco	12.9		
	no oscurecida	14.1	14.2	0.1
	no oscurecida	14.2		
	Oscurecida	10.4	8.6	2.6
	Oscurecida	6.7		
3	Blanco	13.8	14.6	1.1
	Blanco	15.4		

	no oscurecida	17.2	17.5	0.4
	no oscurecida	17.7		
	Oscurecida	9.3	10.0	0.9
	Oscurecida	10.6		
Mayo 2014				
	Estandarización	19.3	19.3	0.0
	Estandarización	19.3		
0	Blanco	9.6	10.6	1.3
	Blanco	11.5		
	no oscurecida	11.3	11.5	0.3
	no oscurecida	11.7		
	Oscurecida	9.8	8.4	2.0
	Oscurecida	7.0		
	Estandarización	17.3	17.4	0.1
	Estandarización	17.4		
1	Blanco	10.4	12.3	2.7
	Blanco	14.2		
	no oscurecida	14.4	14.5	0.1
	no oscurecida	14.5		
	Oscurecida	12.4	11.4	1.5
	Oscurecida	10.3		
2	Blanco	12.8	12.3	0.8
	Blanco	11.7		
	no oscurecida	17.4	13.5	5.5
	no oscurecida	9.6		
	Oscurecida	12.1	11.5	0.8
	Oscurecida	10.9		
3	Blanco	13.4	12.9	0.7
	Blanco	12.4		

	no oscurecida	13.8	13.6	0.4
	no oscurecida	13.3		
	Oscurecida	11.4	12.1	0.9
	Oscurecida	12.7		
Julio 2014				
	Estandarización	19.0	19.0	0.1
	Estandarización	18.9		
0	Blanco	12.0	11.2	1.1
	Blanco	10.4		
	no oscurecida	13.2	13.8	0.8
	no oscurecida	14.3		
	Oscurecida	12.9	11.1	2.6
	Oscurecida	9.2		
1	Blanco	12.8	12.6	0.3
	Blanco	12.4		
	no oscurecida	10.4	13.0	3.6
	no oscurecida	15.5		
	Oscurecida	10.4	10.9	0.7
	Oscurecida	11.4		
2	Blanco	12.1	11.8	0.4
	Blanco	11.5		
	no oscurecida	12.4	12.1	0.5
	no oscurecida	11.7		
	Oscurecida	10.0	10.6	0.8
	Oscurecida	11.1		
3	Blanco	No disponible ⁵	-	-
	Blanco	No disponible ⁶		
	no oscurecida	No disponible ⁷	-	-
	no oscurecida	No disponible ⁸		

	Oscurecida	No disponible ⁹	-	-
	Oscurecida	No disponible ¹⁰		
Septiembre 2014				
	Estandarización	19.3	19.4	0.1
	Estandarización	19.4		
0	Blanco	7.2	7.9	0.9
	Blanco	8.5		
	no oscurecida	10.4	9.4	1.5
	no oscurecida	8.3		
	oscurecida	5.3	4.1	1.7
	oscurecida	2.9		
1	blanco	6.7	6.8	0.1
	blanco	6.8		
	no oscurecida	8.1	7.6	0.7
	no oscurecida	7.1		
	oscurecida	5.5	5.2	0.4
	oscurecida	4.9		
2	blanco	5.9	6.2	0.4
	blanco	6.5		
	no oscurecida	6.4	6.3	0.2
	no oscurecida	6.1		
	oscurecida	5.9	4.5	2.0
	oscurecida	3.1		
3	Blanco	6.7	7.1	0.5
	Blanco	7.4		
	no oscurecida	6.5	7.4	1.3
	no oscurecida	8.3		
	oscurecida	4.5	5.8	1.8
	oscurecida	7.0		

Noviembre 2014				
	Estandarización	22.1	22.5	0.6
	Estandarización	22.9		
0	Blanco	5.4	6.2	1.1
	Blanco	6.9		
	no oscurecida	5.9	6.4	0.7
	no oscurecida	6.9		
	Oscurecida	5.7	4.4	1.8
	Oscurecida	3.1		
	Estandarización	47.1	46.9	0.3
		46.7		
1	Blanco	11.5	9.3	3.2
	Blanco	7.0		
	no oscurecida	9.5	12.9	4.7
	no oscurecida	16.2		
	Oscurecida	5.7	5.8	0.1
	Oscurecida	5.9		
2	Blanco	8.8	9.4	0.8
	Blanco	9.9		
	no oscurecida	8.8	9.9	1.5
	no oscurecida	10.9		
	Oscurecida	8.6	9.3	1.0
	Oscurecida	10.0		
3	Blanco	7.7	8.7	1.4
	Blanco	9.7		
	no oscurecida	9.1	9.5	0.6
	no oscurecida	9.9		
	Oscurecida	3.5	7.1	5.1
	Oscurecida	10.7		

Enero 2015				
	Estandarización	46.8	46.8	0.1
	Estandarización	46.7		
0	Blanco	4.4	4.3	0.2
	Blanco	4.1		
	no oscurecida	4.3	4.3	0.0
	no oscurecida	4.3		
	Oscurecida	3.9	3.9	0.0
	Oscurecida	3.9		
1	Blanco	5.2	4.7	0.7
	Blanco	4.2		
	no oscurecida	4.3	4.8	0.6
	no oscurecida	5.2		
	Oscurecida	4.0	3.8	0.4
	Oscurecida	3.5		
2	Blanco	2.6	2.8	0.3
	Blanco	3.0		
	no oscurecida	2.4	3.8	1.9
	no oscurecida	5.1		
	Oscurecida	1.1	2.5	1.9
	Oscurecida	3.8		
3	Blanco	5.4	5.0	0.6
	Blanco	4.6		
	no oscurecida	5.0	5.2	0.3
	no oscurecida	5.4		
	Oscurecida	4.1	4.3	0.2
	Oscurecida	4.4		

Fuente: Datos experimentales

Nota: 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10 Debido a errores experimentales estos valores no fueron incluidos.

Cuadro 24: Radiación solar expresada en W/m², registrada de forma horaria de los días en los que fueron realizadas las mediciones en campo.

	18/03/14	06/05/14	02/07/14	23/09/14	13/11/14	20/01/2015
01	0	0	0	0	0	0
02	0	0	0	0	0	0
03	0	0	0	0	0	0
04	0	0	0	0	0	0
05	0	5.37:0	5	1	0	0
06	41	-	57	75	0	0
07	119	-	191	238	36	8
08	233	-	475	509	216	139
09	414	-	640	674	386	336
10	695	-	815	784	633	508
11	818	11.50:987	907	853	605	704
12	835	-	810	880	392	803
13	531	-	868	195	646	539
14	647	-	418	95	675	671
15	551	-	453	134	428	614
16	306	-	99	15	298	386
17	90	-	50	1	86	61
18	2	18.20:0	1	0	8	20
19	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0

Fuente: Datos recabados por la estación central de monitoreo del aire del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología INSIVUMEH (marzo a septiembre) y por la estación del lago de Amatitlán de la Autoridad para el Manejo Sustentable de la cuenca y del lago de Amatitlán (AMSA).

Cuadro 25: Tiempo de incubación de muestras de fitoplancton expresado en horas, tomados en los sitios de muestreo ubicados en el centro este y centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en marzo del 2014 a enero del 2015.

	Centro Este	Centro Oeste
	H	H
Marzo	2.00	3.45
Mayo	1.45	4.15
Julio	1.30	4.00
Septiembre	2.00	3.30
Noviembre	2.00	3.20
Enero	2.00	4.00

Fuente: Datos experimentales

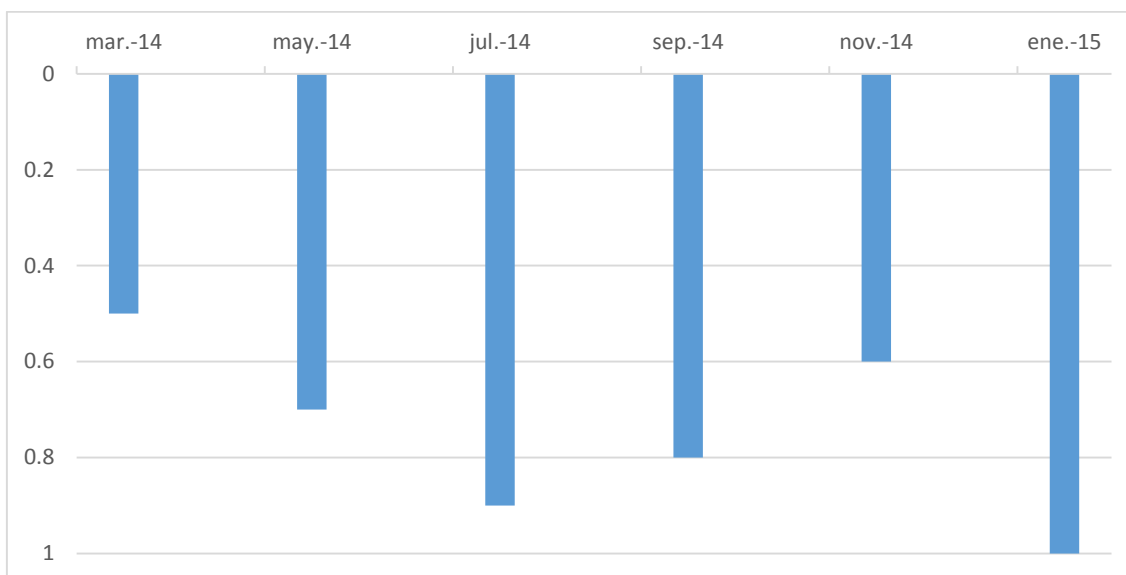


Figura 24: Transparencia medida en metros por medio de disco Secchi, tomada en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en marzo del 2014 a enero del 2015. (Fuente: Datos experimentales)

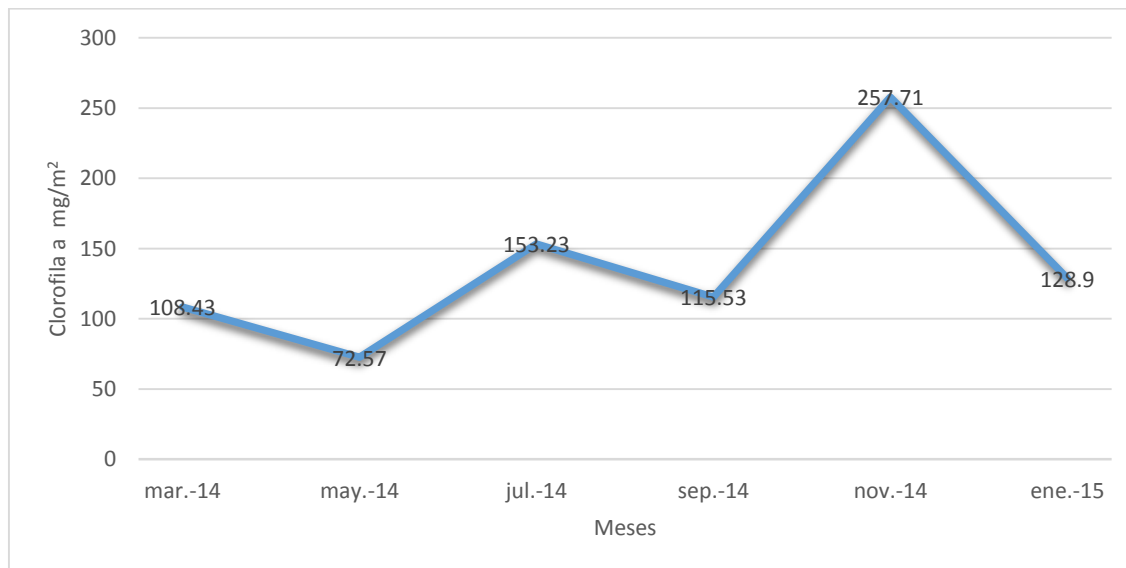


Figura 25: clorofila a expresada en mg/m², tomada en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en marzo del 2014 a enero del 2015. (Fuente: Datos experimentales).

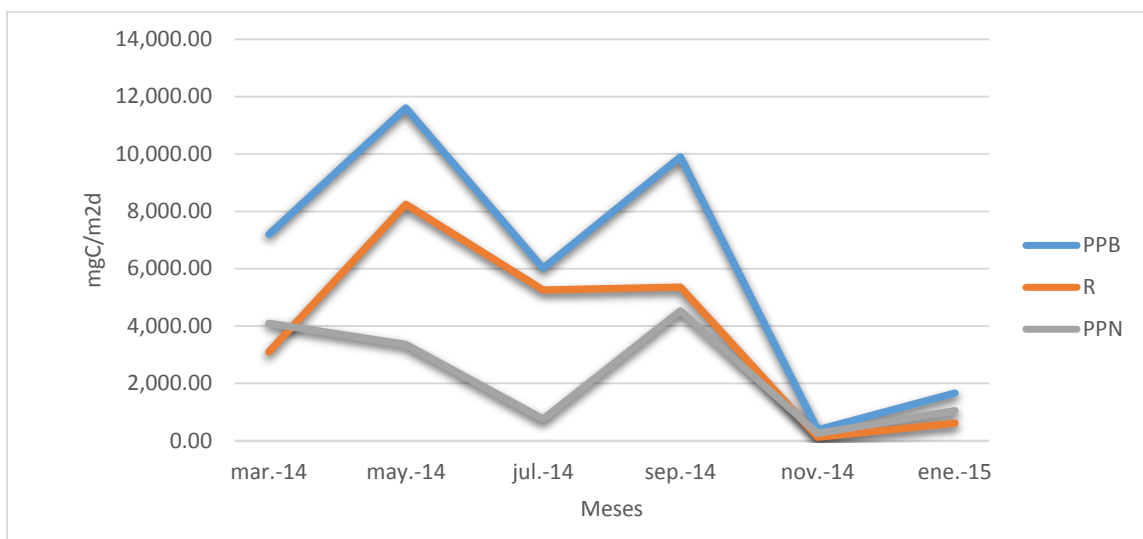


Figura 26: Productividad primaria bruta, productividad primaria neta y respiración expresada en mg C/m²d, tomada en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en marzo del 2014 a enero del 2015. (Fuente: Datos experimentales).

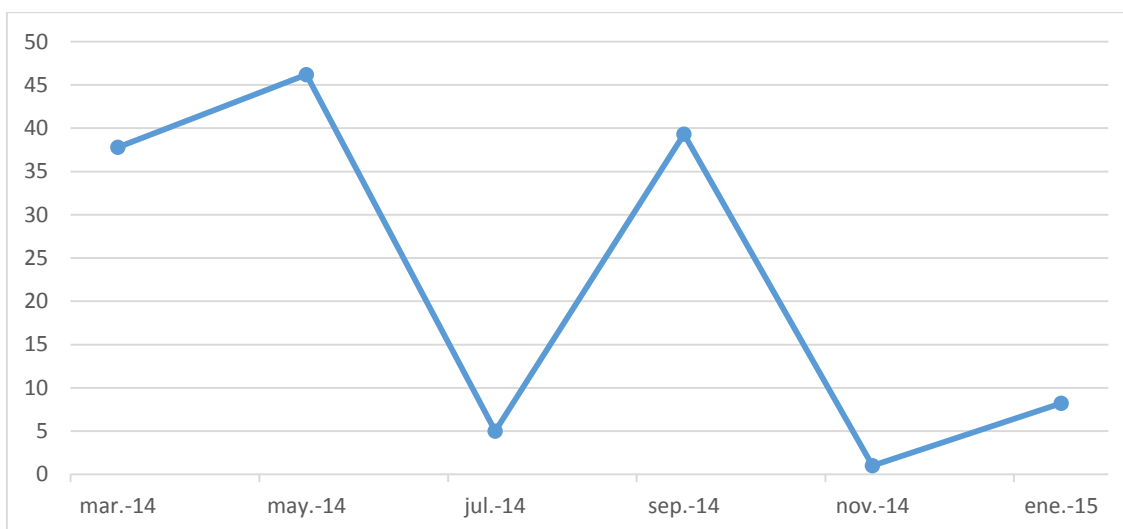


Figura 27: Coeficiente de asimilación de carbono expresado en mg C/mg clorofila-a *d, tomada en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en marzo del 2014 a enero del 2015. (Fuente: Datos experimentales).

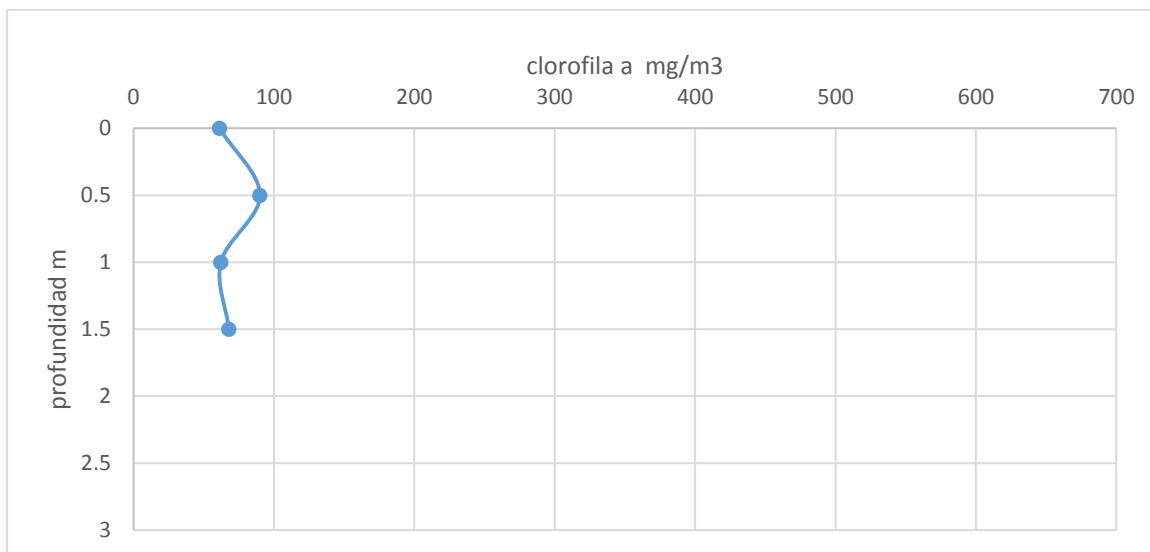


Figura 28: Perfil de clorofila *a* expresada en mg/m^3 , tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en marzo del 2014. (Fuente: datos experimentales).

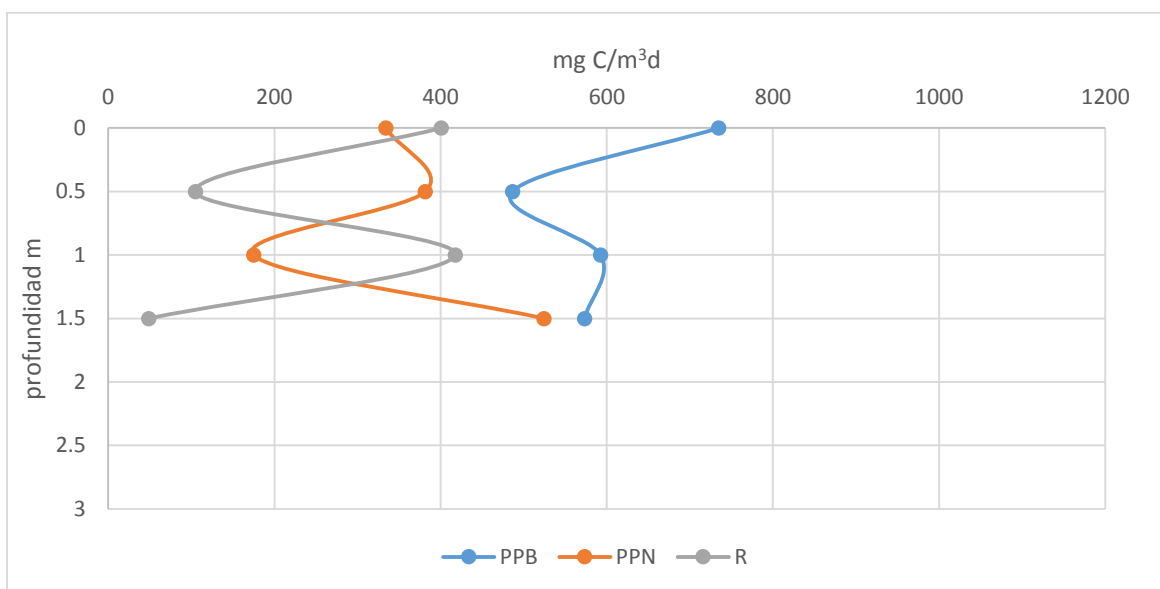


Figura 29: Perfil de productividad primaria bruta, productividad primaria neta y respiración expresada en $\text{mg C}/\text{m}^3\text{d}$, tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en marzo del 2014. (Fuente: datos experimentales).

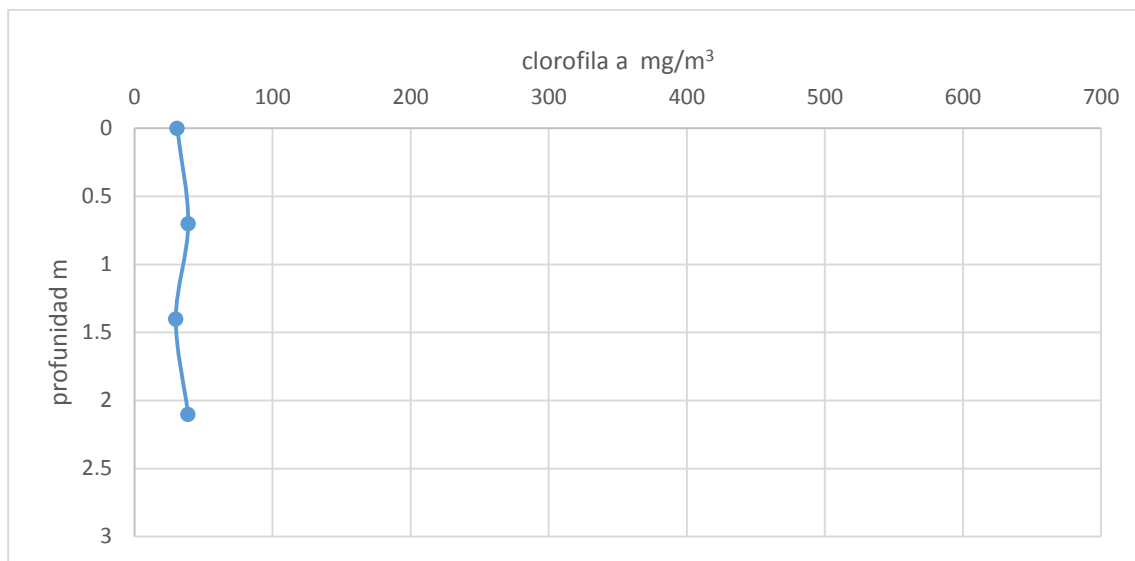


Figura 30: Perfil de clorofila a expresada en mg/m^3 , tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en mayo del 2014. (Fuente: datos experimentales).

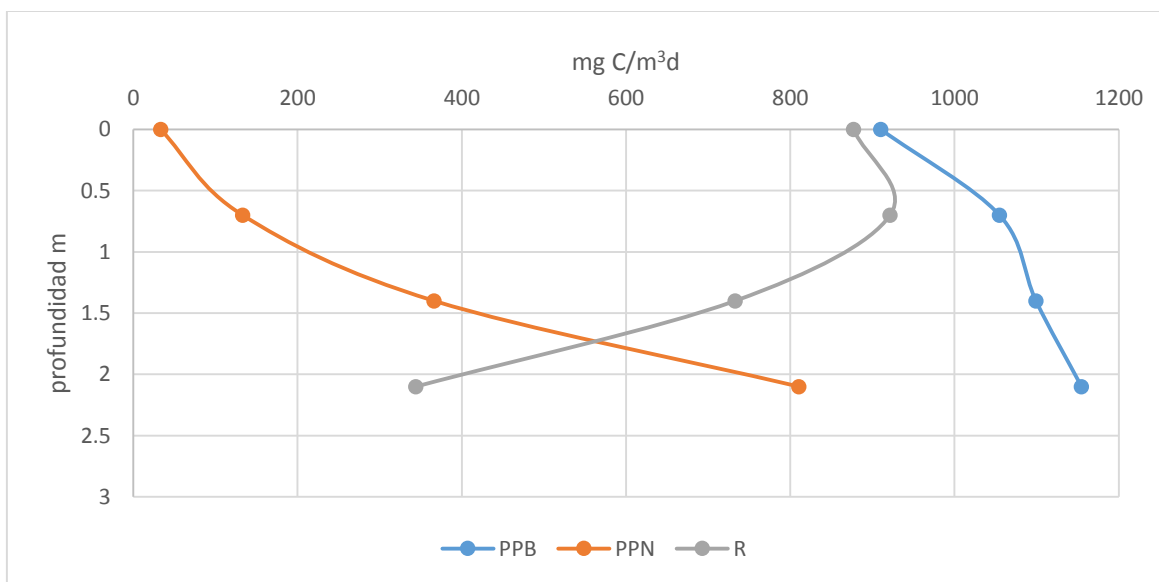


Figura 31: Perfil de productividad primaria bruta, productividad primaria neta y respiración expresada en $\text{mg C}/\text{m}^3\text{d}$, tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en mayo del 2014. (Fuente: datos experimentales).

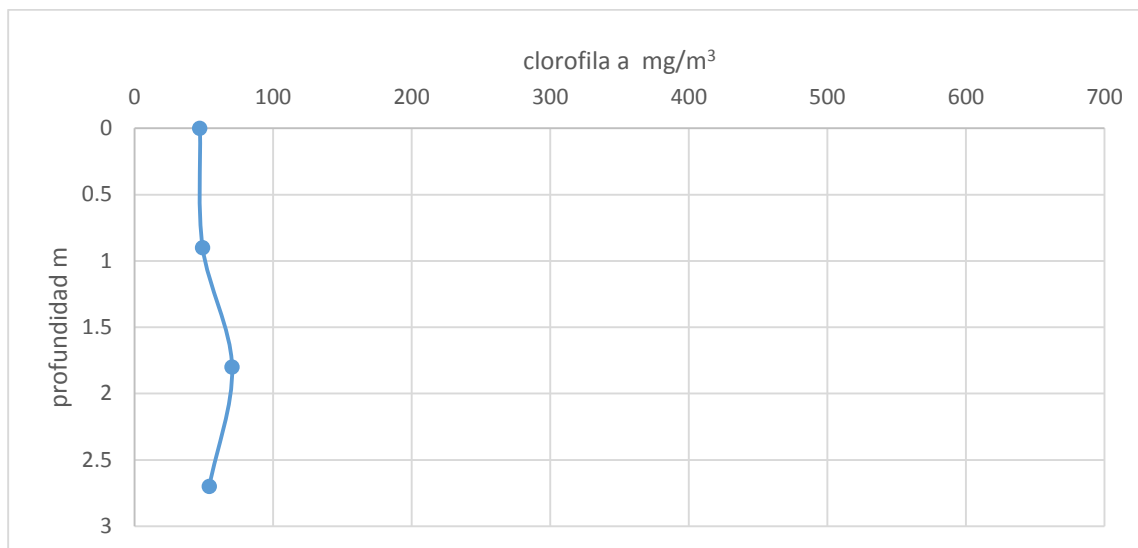


Figura 32: Perfil de clorofila *a* expresada en mg/m^3 , tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatlán, durante las mediciones realizadas en julio del 2014. (Fuente: datos experimentales).

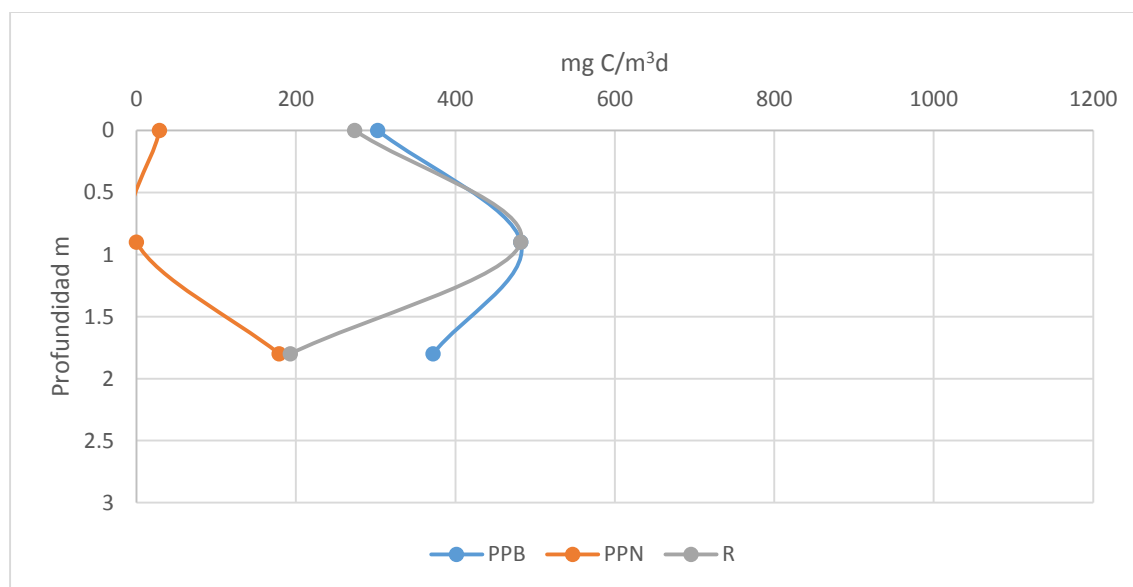


Figura 33: Perfil de productividad primaria bruta, productividad primaria neta y respiración expresada en $\text{mg C}/\text{m}^3\text{d}$, tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatlán, durante las mediciones realizadas en julio del 2014. (Fuente: datos experimentales).

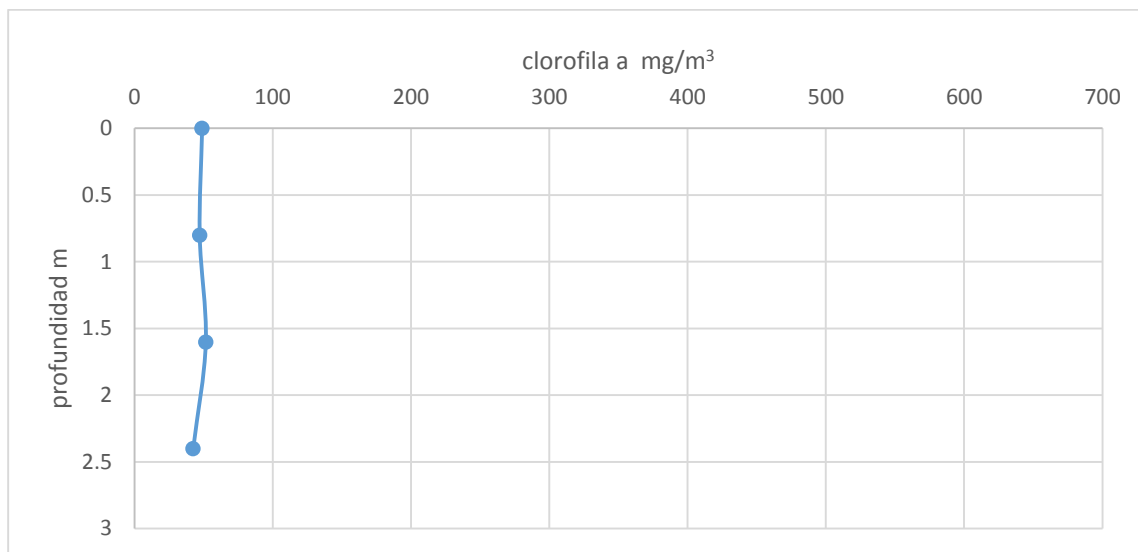


Figura 34: Perfil de clorofila *a* expresada en mg/m^3 , tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatlán, durante las mediciones realizadas en septiembre del 2014. (Fuente: datos experimentales).

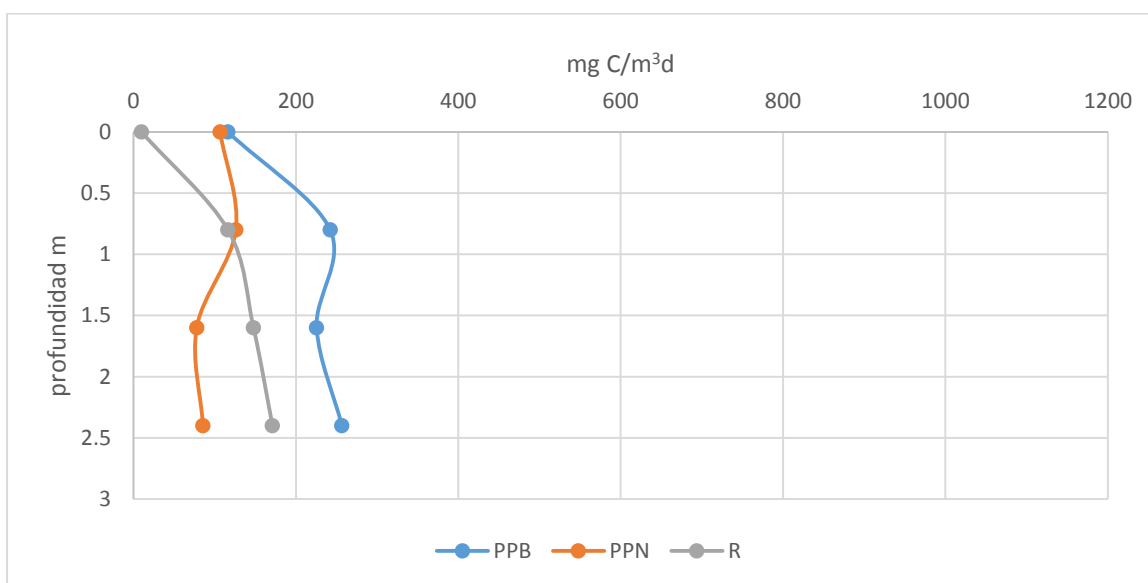


Figura 35: Perfil de productividad primaria bruta, productividad primaria neta y respiración expresada en $\text{mg C}/\text{m}^3\text{d}$, tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatlán, durante las mediciones realizadas en septiembre del 2014. (Fuente: datos experimentales).

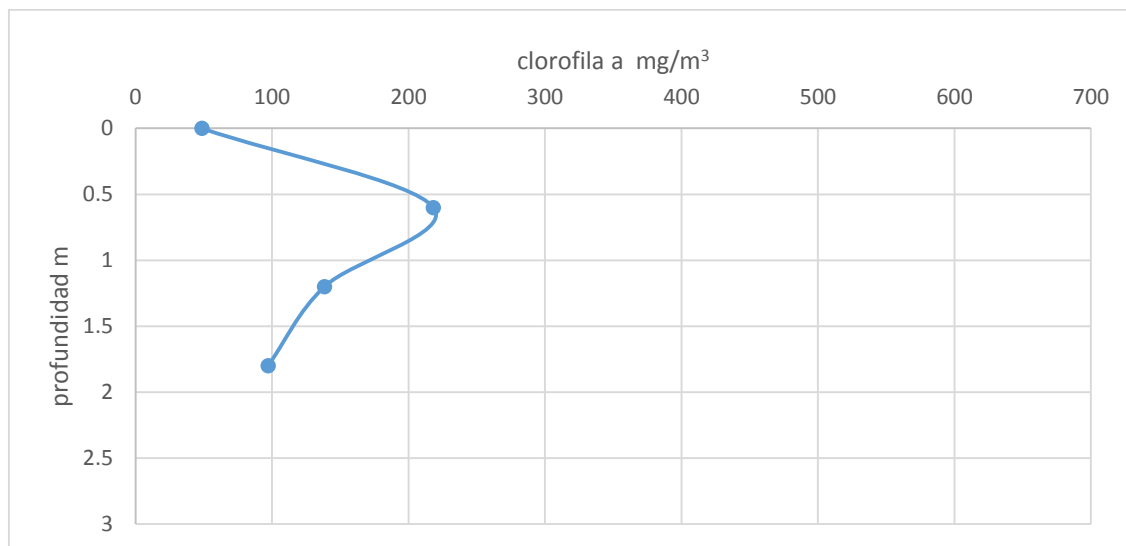


Figura 36: Perfil de clorofila *a* expresada en mg/m^3 , tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatlán, durante las mediciones realizadas en noviembre del 2014. (Fuente: datos experimentales).

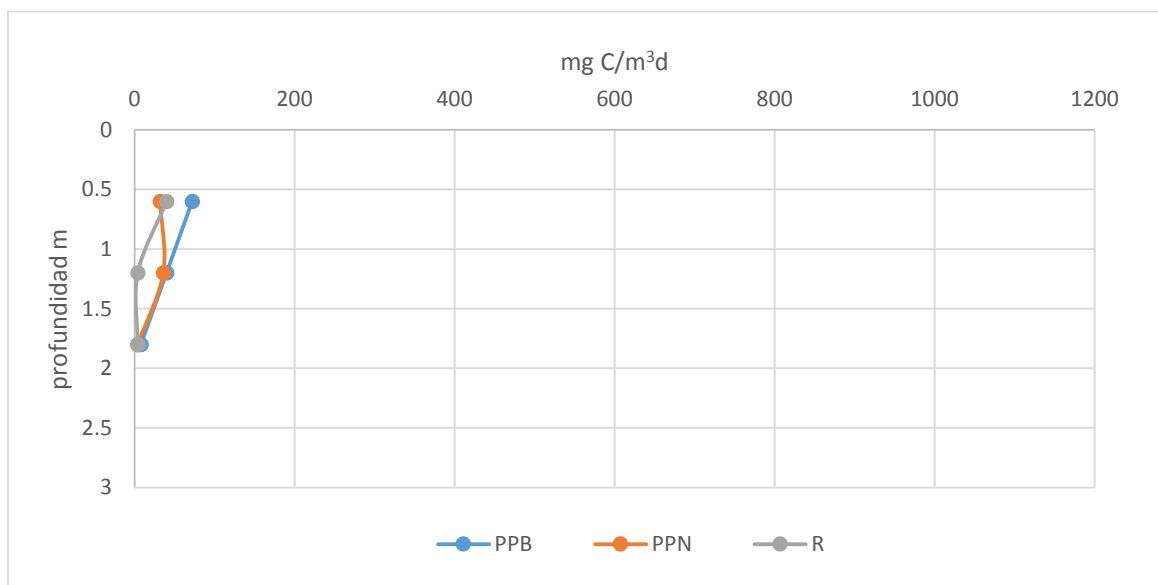


Figura 37: Perfil de productividad primaria bruta, productividad primaria neta y respiración expresada en $\text{mg C}/\text{m}^3\text{d}$, tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatlán, durante las mediciones realizadas en noviembre del 2014. (Fuente: datos experimentales).

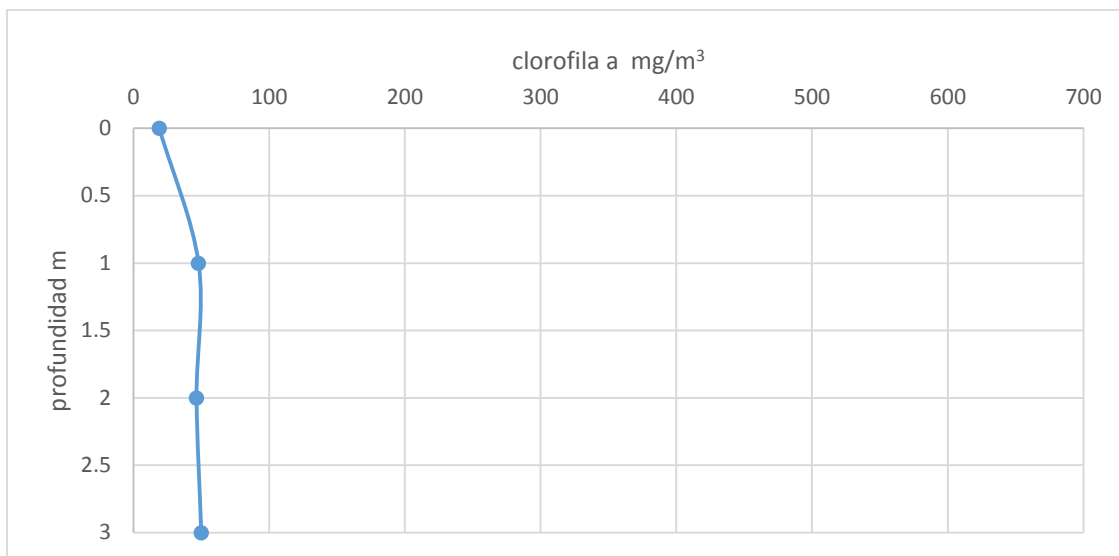


Figura 38: Perfil de clorofila a expresada en mg/m^3 , tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en enero del 2015. (Fuente: datos experimentales).

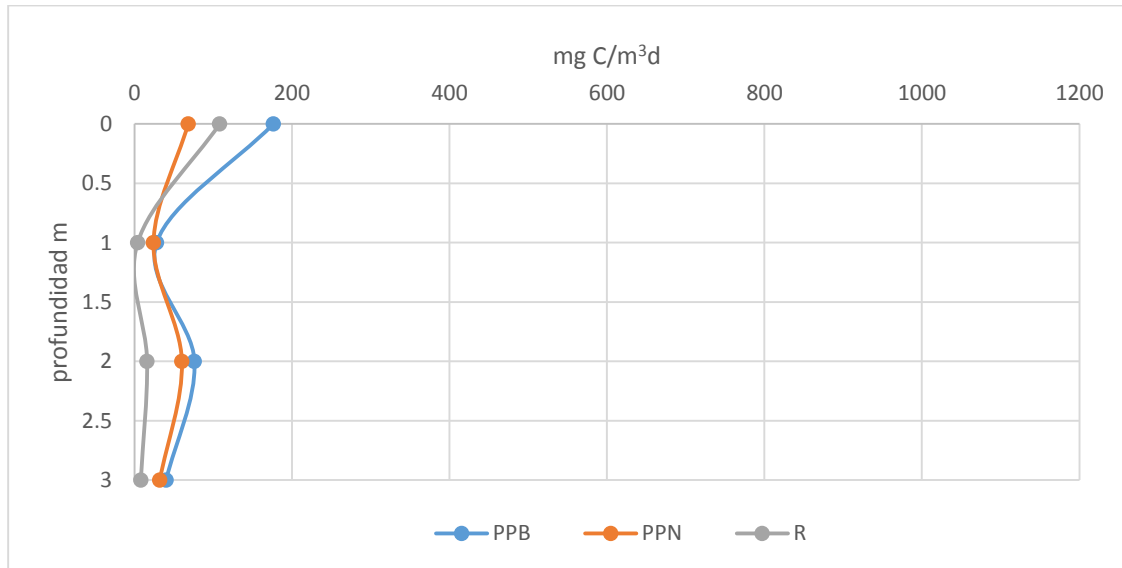


Figura 39: Perfil de productividad primaria bruta, productividad primaria neta y respiración expresada en $\text{mg C}/\text{m}^3\text{d}$, tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro este del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en enero del 2015. (Fuente: datos experimentales).

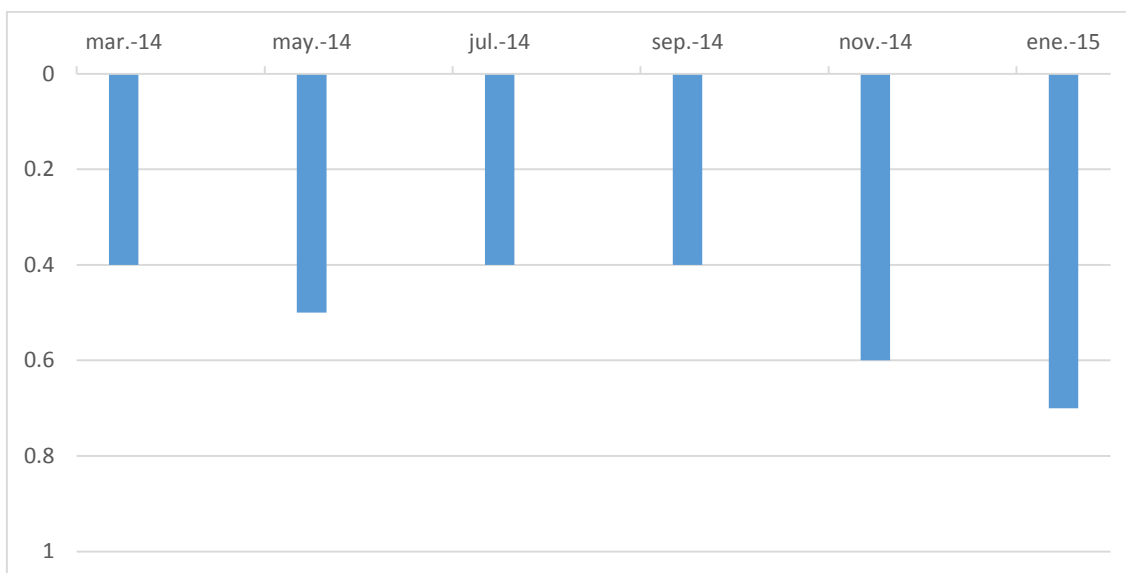


Figura 40: Transparencia medida en metros por medio de disco Secchi, tomada en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en marzo del 2014 a enero del 2015. (Fuente: datos experimentales).

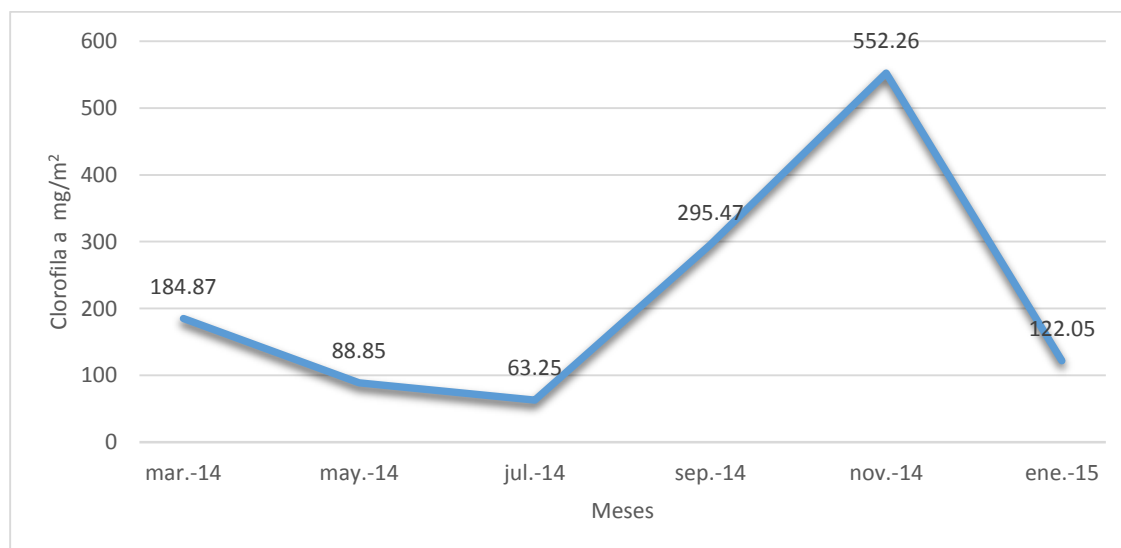


Figura 41: clorofila a expresada en mg/m², tomada en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en marzo del 2014 a enero del 2015. (Fuente: Datos experimentales).

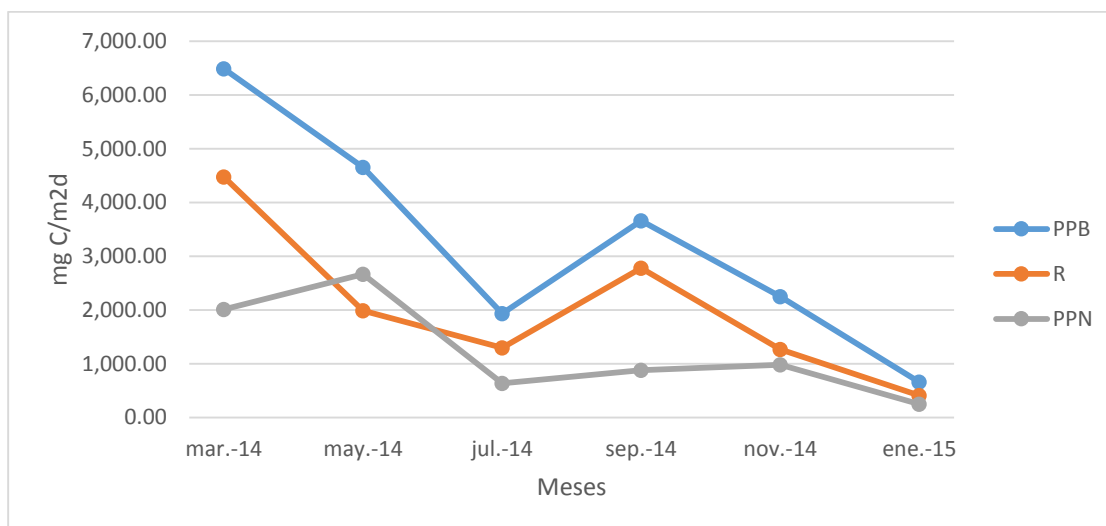


Figura 42: Productividad primaria bruta, productividad primaria neta y respiración expresada en mg C/m²d, tomada en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en marzo del 2014 a enero del 2015. (Fuente: Datos experimentales).

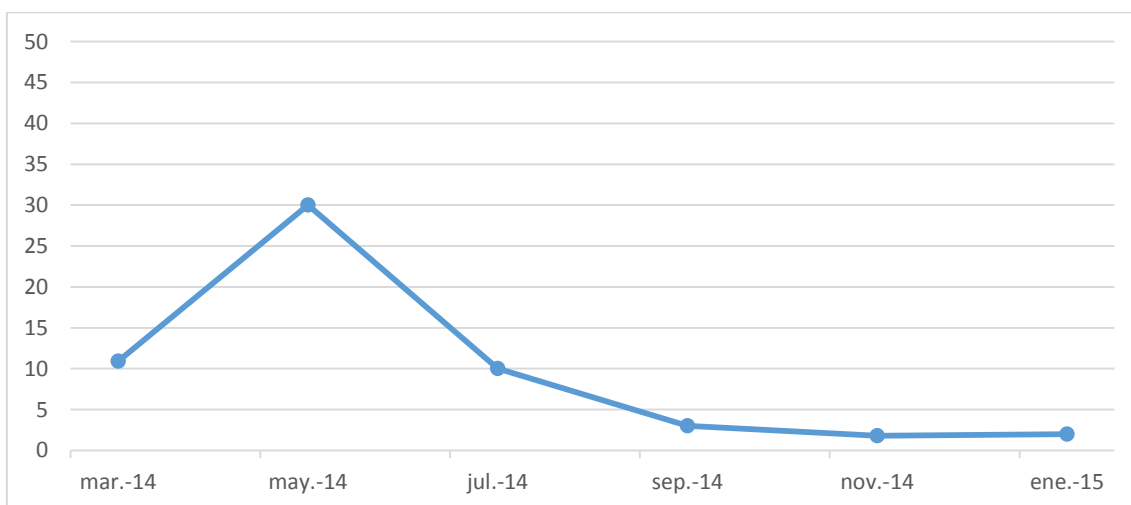


Figura 43: Coeficiente de asimilación de carbono expresado en mg C/mg clorofila-a*d, tomada en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en marzo del 2014 a enero del 2015. (Fuente: Datos experimentales).

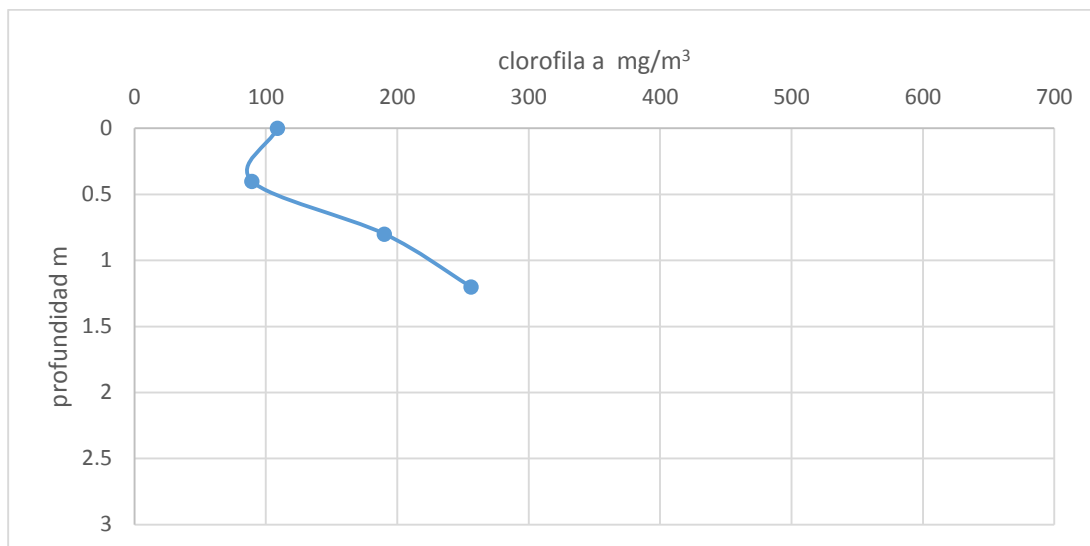


Figura 44: Perfil de clorofila a expresada en mg/m^3 , tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en marzo del 2014. (Fuente: Datos experimentales).

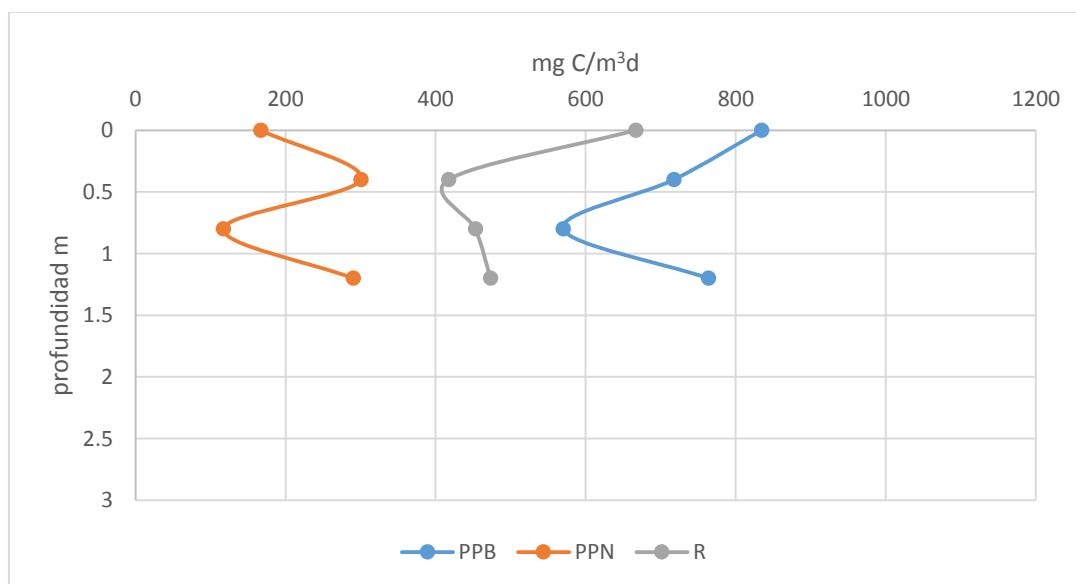


Figura 45: Perfil de productividad primaria bruta, productividad primaria neta y respiración expresada en $\text{mg C/m}^3\text{d}$, tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en marzo del 2014. (Fuente: Datos experimentales).

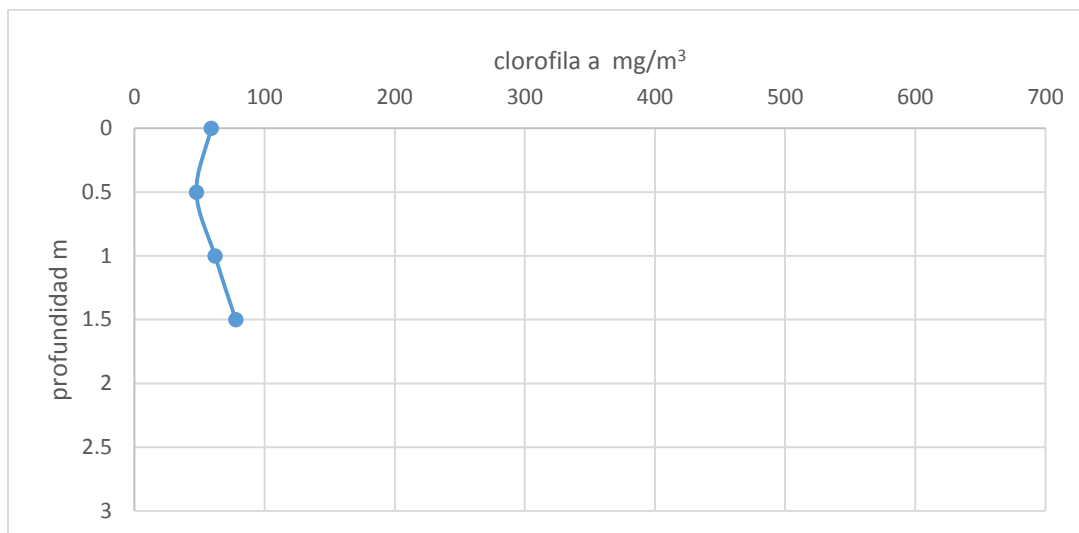


Figura 46: Perfil de clorofila *a* expresada en mg/m^3 , tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en mayo del 2014. (Fuente: datos experimentales).

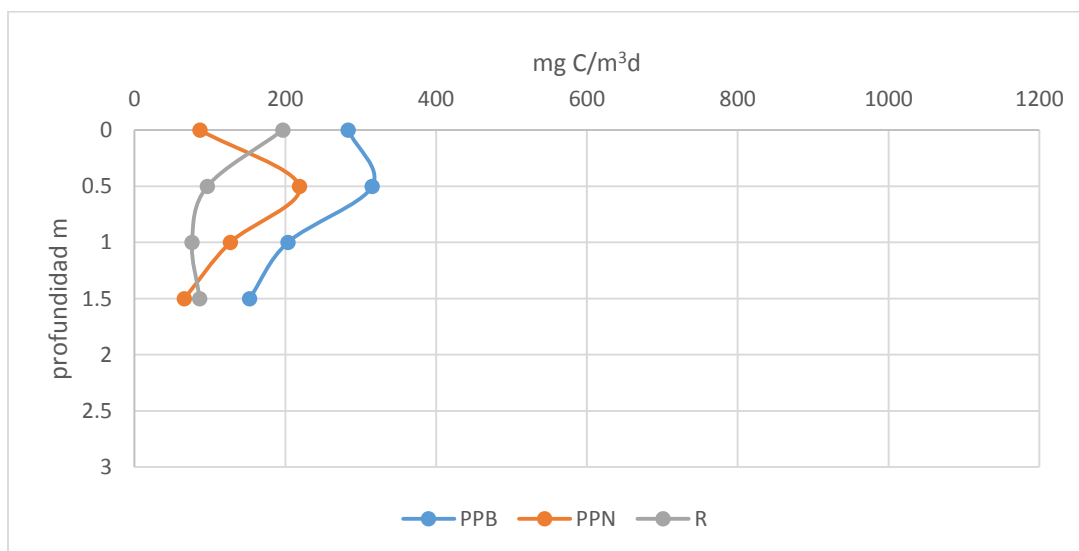


Figura 47: Perfil de productividad primaria bruta, productividad primaria neta y respiración expresada en $\text{mg C}/\text{m}^3\text{d}$, tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en mayo del 2014. (Fuente: datos experimentales).

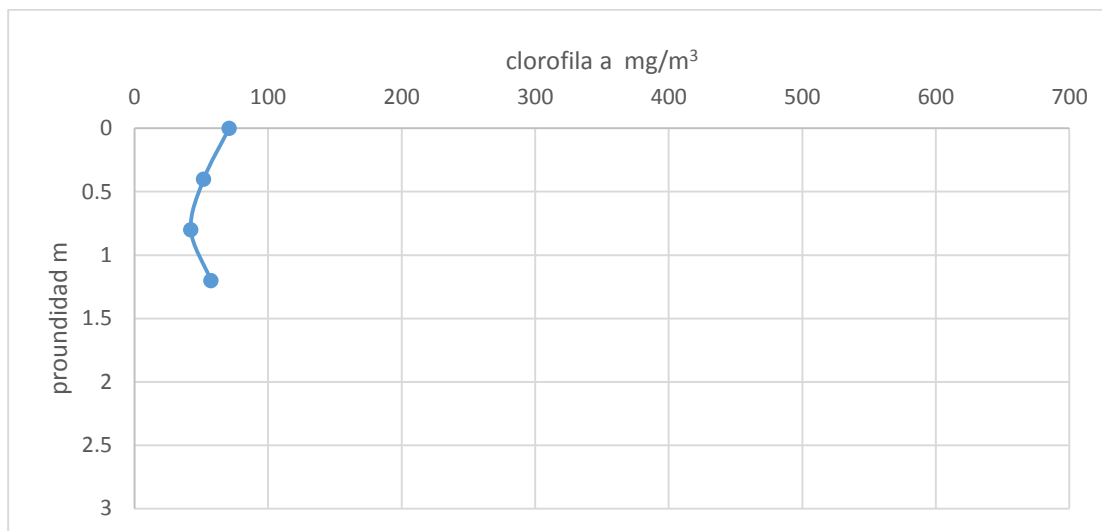


Figura 48: Perfil de clorofila a expresada en mg/m^3 , tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en julio del 2014. (Fuente: datos experimentales).

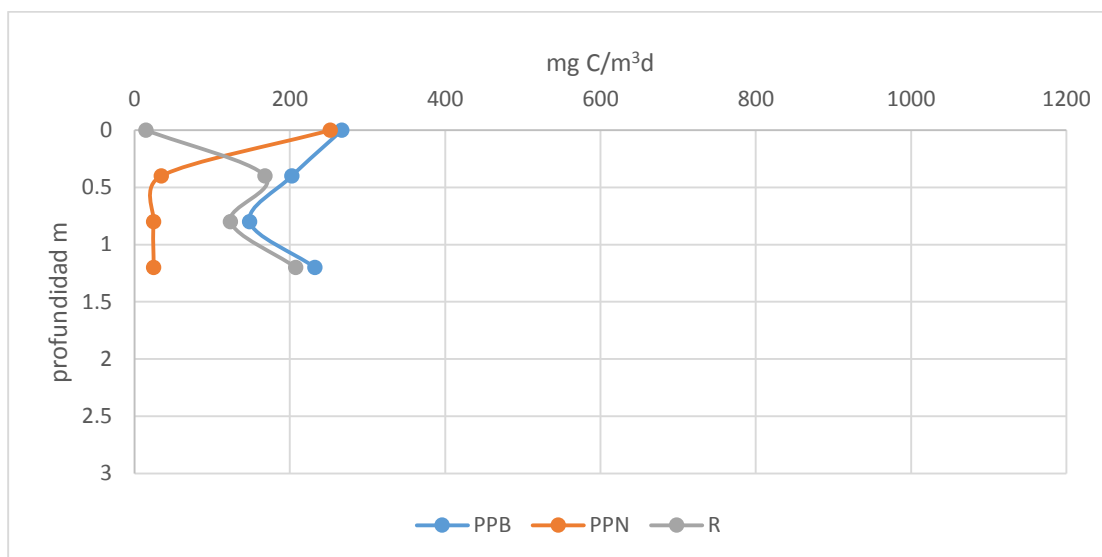


Figura 49: Perfil de productividad primaria bruta, productividad primaria neta y respiración expresada en $\text{mg C}/\text{m}^3\text{d}$, tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en julio del 2014. (Fuente: datos experimentales).

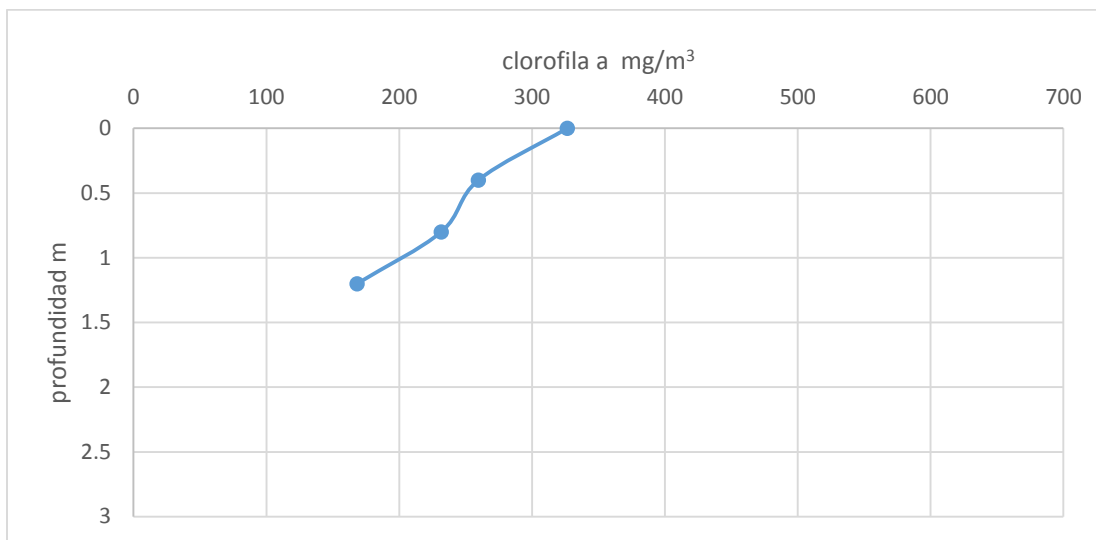


Figura 50: Perfil de clorofila *a* expresada en mg/m^3 , tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en septiembre del 2014. (Fuente: datos experimentales).

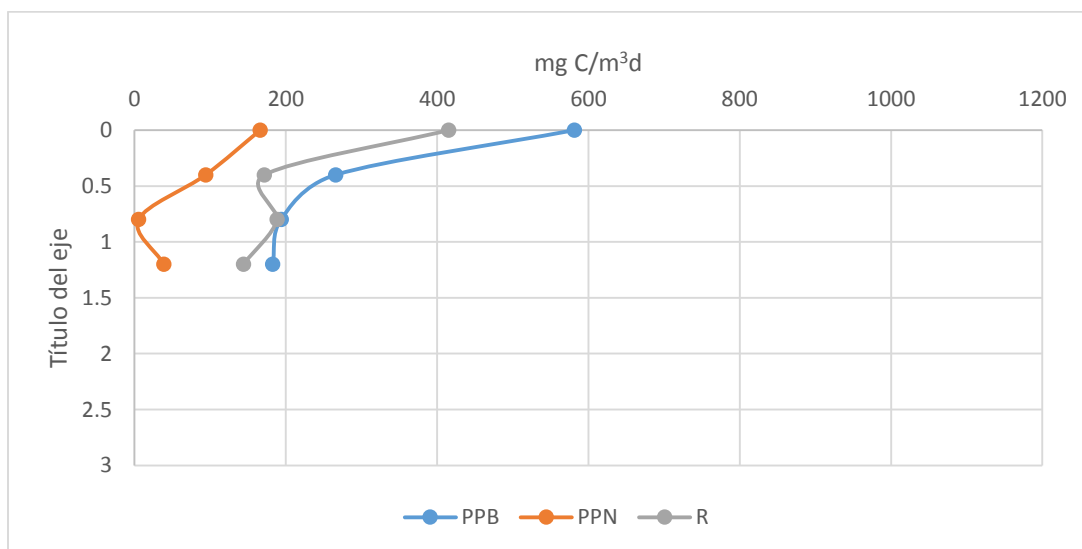


Figura 51: Perfil de productividad primaria bruta, productividad primaria neta y respiración expresada en $\text{mg C}/\text{m}^3\text{d}$, tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en septiembre del 2014. (Fuente: datos experimentales).

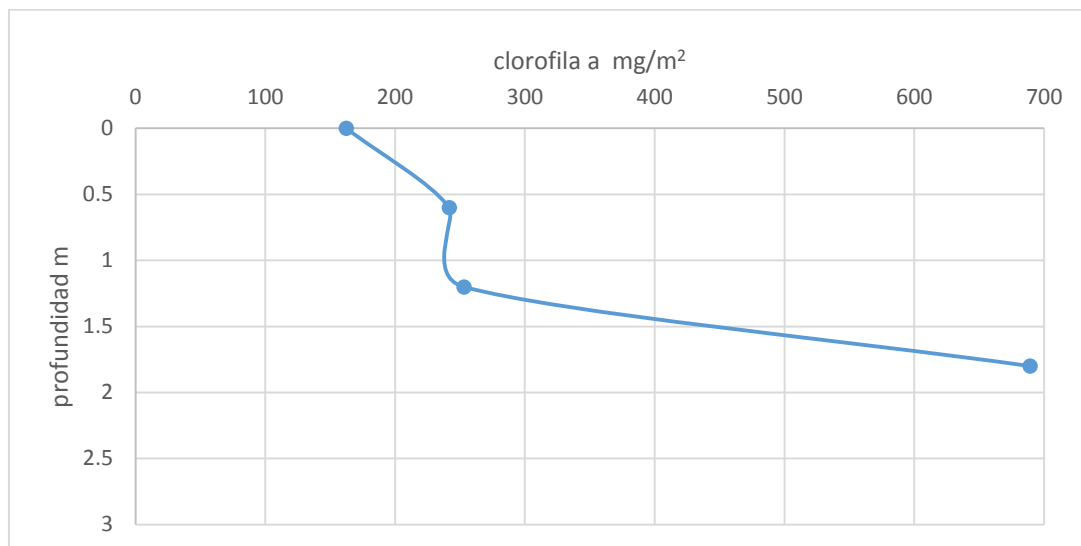


Figura 52: Perfil de clorofila *a* expresada en mg/m^3 , tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en noviembre del 2014. (Fuente: datos experimentales).

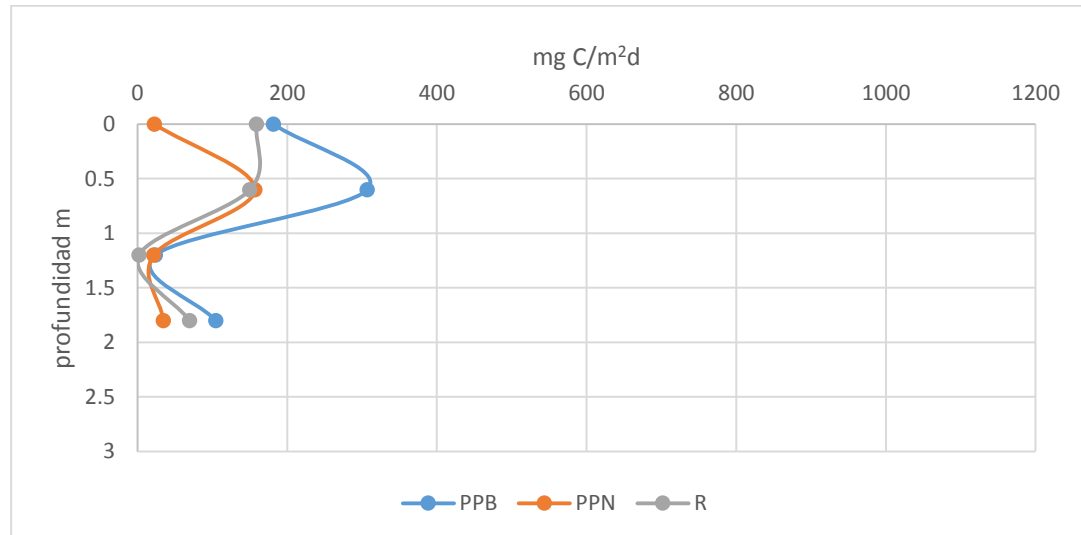


Figura 53: Perfil de productividad primaria bruta, productividad primaria neta y respiración expresada en $\text{mg C}/\text{m}^3\text{d}$, tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en noviembre del 2014. (Fuente: datos experimentales).

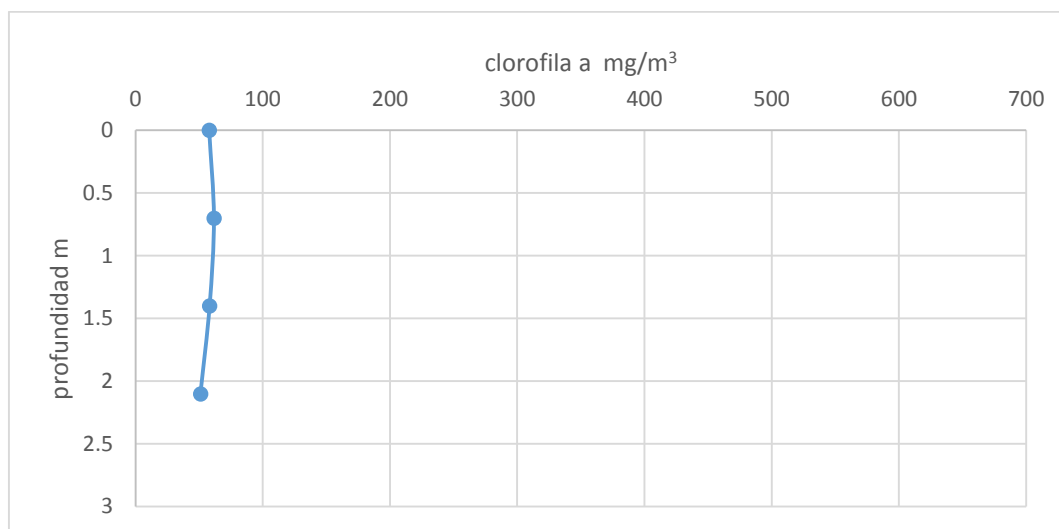


Figura 54: Perfil de clorofila a expresada en mg/m^3 , tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en enero del 2015. (Fuente: datos experimentales).

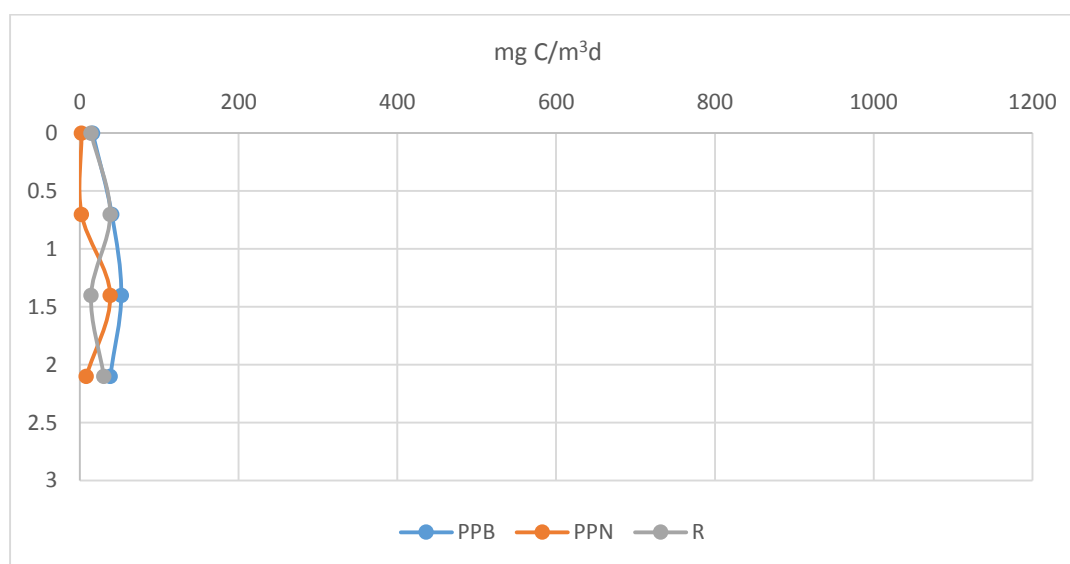
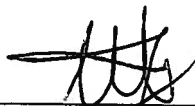


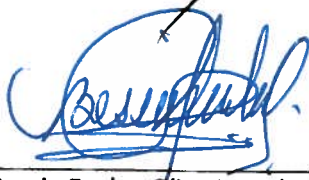
Figura 55: Perfil de productividad primaria bruta, productividad primaria neta y respiración expresada en $\text{mg C/m}^3\text{d}$, tomado en el sitio de muestreo ubicado en el centro oeste del lago de Amatitlán, durante las mediciones realizadas en enero del 2015. (Fuente: datos experimentales).



Br. Andrea Alejandra Azurdia Juárez
Autora



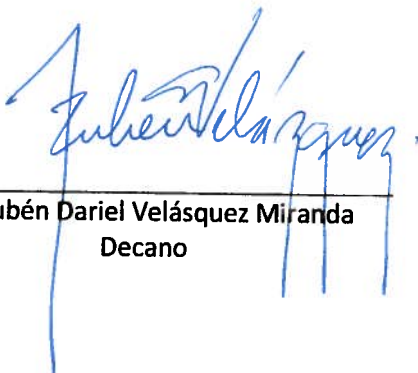
Lic. Julio Roberto Juárez Pernillo
Asesor



M. Sc Bessie Evelyn Oliva Hernández
Asesora



Dr. Juan Francisco Pérez Sabino
Director



Dr. Rubén Daríel Velásquez Miranda
Decano