



Universidad de San Carlos de Guatemala
Dirección General de Investigación
Programa Universitario de Investigación
En Ciencias Básicas

INFORME FINAL

EVALUACIÓN DE CONTAMINANTES EMERGENTES Y RADIATIVOS EN EL LAGO DE ATITLÁN

Equipo de investigación

Juan Francisco Pérez Sabino
Elisandra Hernández Hernández
Baltimore Salvador Valladares Jovel

Coordinador
Investigadora
Auxiliar de Investigación II

Noviembre de 2014

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES QUIMICAS Y BIOLÓGICAS-IIQB
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA

Instituciones participantes

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



M.Sc. Gerardo Arroyo Catalán
Director General de Investigación

Ing. Agr. MARN Julio Rufino Salazar
Coordinador General de Programas

Ing. Agr. MARN Julio Rufino Salazar
Coordinador Programa Universitario de Investigación de Ciencias Básicas

Dr. Juan Francisco Pérez Sabino
Coordinador del proyecto.

Licda. Elisandra Hernández Hernández
Investigadora

Br. Balmore Salvador Valladares Jovel
Auxiliar de Investigación II

M. Sc. Bessie Evelyn Oliva Hernández
Colaboradora

Licda. Marta María Del Cid Mendizábal
Colaboradora

Lic. Pedro Guillermo Jayes
Colaborador

Br. Walda Renée Salazar Flores
Colaboradora

Partida Presupuestaria
4.8.63.7.28
Año de ejecución: 2014

CONTENIDO

CONTENIDO GENERAL	01
CONTENIDO DE FIGURAS	02
CONTENIDO DE TABLAS	03
TÍTULO DEL PROYECTO Y RESUMEN	04
ABSTRACT	05
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	06
MARCO TEÓRICO/ESTADO DEL ARTE	08
OBJETIVOS	10
HIPÓTESIS	10
METODOLOGÍA	10
i. Ubicación Geográfica	11
ii. Descripción del método, técnicas, procedimientos e instrumentos	11
iii. Metodología de análisis de información	13
RESULTADOS	13
DISCUSIÓN DE RESULTADOS	36
ACTIVIDADES DE GESTIÓN, VINCULACIÓN Y DIVULGACIÓN	50
CONCLUSIONES	43
RECOMENDACIONES	44
BIBLIOGRAFÍA	44
ANEXOS	47

INDICE DE ILUSTRACIONES

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Perfil de pH en sitios del Lago de Atitlán muestreo marzo 2014	14
Figura 2 Perfil de pH en sitios del Lago de Atitlán muestreo mayo 2014	15
1. Figura 3 Perfil de pH en sitios del Lago de Atitlán muestreo agosto 2014	16
Temperatura en el Lago de Atitlán muestreo marzo 2014	17
2. Temperatura en el Lago de Atitlán muestreo mayo 2014	18
3. Temperatura en el Lago de Atitlán muestreo agosto 2014	19
4. Oxígeno Disuelto durante el primer muestreo marzo 2014	20
5. Oxígeno Disuelto durante el segundo muestreo mayo 2014	21
6. Oxígeno Disuelto durante el tercer muestreo agosto 2014	22
7. Porcentaje de saturación de Oxígeno Disuelto marzo 2014	23
8. Porcentaje de saturación de Oxígeno Disuelto mayo 2014	24
9. Porcentaje de saturación de Oxígeno Disuelto agosto 2014	25
10.	32
11. Fármacos detectados en salida de planta de tratamiento	33
12. Nitrógeno de nitratos en el Lago de Atitlán	38
13. Nitrógeno de nitritos en el Lago de Atitlán	39a
14. Nitrógeno total en el Lago de Atitlán	40
15. Fósforo de ortofosfatos en el Lago de Atitlán	41
16. Fósforo total en el Lago de Atitlán	42
17. Sólidos disueltos en el Lago de Atitlán	43
18. Sólidos en suspensión en el Lago de Atitlán	43
19. Sólidos totales en el Lago de Atitlán	44
20. Sulfatos en el Lago de Atitlán	45
21. Demanda Química de Oxígeno en el Lago de Atitlán	45
22. Arsénico en el Lago de Atitlán	46
23. Mercurio en el Lago de Atitlán	47

24. Fitoplancton frente al río Quiscab durante marzo 2014	49
25. Fitoplancton en el centro del Lago Atitlán durante marzo 2014	49
26. Fitoplancton en Santa Catarina Palopó durante marzo 2014	50
27. Fitoplancton en Tzanpetey durante marzo de 2014	50
28. Fármacos detectados en salida de planta de tratamiento	

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Nitrógeno de nitratos en el Lago de Atitlán	26
Tabla 2 Nitrógeno de nitritos en el Lago de Atitlán	26
Tabla 3 Nitrógeno total en el Lago de Atitlán	27
Tabla 4 Fósforo de ortofosfatos en el Lago de Atitlán	27
Tabla 5 Fósforo total en el Lago de Atitlán	28
Tabla 6 Sólidos disueltos en el Lago de Atitlán	28
Tabla 7 Sólidos en suspensión en el Lago de Atitlán	29
Tabla 8 Sólidos totales en el Lago de Atitlán	29
Tabla 9 Sulfatos en el Lago de Atitlán	30
Tabla 10 Demanda Química de Oxígeno en el Lago de Atitlán	30
Tabla 11 Radionucleidos en el Lago de Atitlán	31
Tabla 12 Arsénico en el Lago de Atitlán	31
Tabla 13 Mercurio en el Lago de Atitlán	32
Tabla 14 Fitoplancton frente al río Quiscab durante marzo 2014	33
Tabla 15 Fitoplancton en el centro del lago Atitlán durante marzo 2014	33
Tabla 16 Fitoplancton en Santa Catarina Palopó durante marzo 2014	34
Tabla 17 Fitoplancton en Tzantpetey durante marzo 2014	34

Título completo del proyecto

Evaluación de Contaminantes Emergentes y Radiactivos en el Lago de Atitlán

1. RESUMEN

En el presente estudio se investigaron los niveles de contaminación por radionucleidos, metales tóxicos y contaminantes emergentes en el Lago de Atitlán, con la colaboración de la Autoridad para el Manejo Sustentable del Lago de Atitlán y su Entorno (AMSCLAE). Para esto se realizaron cuatro muestreos, en marzo, mayo, agosto y octubre de 2014, colectándose muestras de agua, peces y sedimentos, en 14 sitios de muestreo, habiéndose determinado también otros parámetros fisicoquímicos que definen la calidad del agua, así como perfiles de pH, temperatura y oxígeno disuelto.

Los perfiles de oxígeno disuelto mostraron que el lago presenta buenos niveles de oxigenación hasta los 30 m, lo cual es bueno para la vida acuática. Se encontraron niveles de pH ligeramente alcalinos, al igual que en estudios realizados con anterioridad. En cuanto a los niveles de nutrientes en el lago, determinados por espectrofotometría UV/Vis, se encontró que las concentraciones de nitrógeno de nitratos y nitritos, no son lo suficientemente elevadas para representar una amenaza para la salud humana ni la vida acuática. El fósforo de fosfatos se encontró en niveles normales, en concentraciones que en combinación con otros factores ambientales, como la temperatura, podrían favorecer las floraciones algales. Se encontró que los niveles de nutrientes en los ríos Quiscab y San Francisco son mayores que en el lago, al igual que los niveles encontrados en la Planta de Tratamiento de aguas residuales “Los Cebollales” ubicada en Panajachel, lo cual indica que las descargas de aguas residuales al lago continúan siendo una fuente importante de nutrientes en el Lago de Atitlán.

Se logró determinar los niveles de los radionucleidos naturales plomo-210, radio-226 y del radionucleido artificial cesio-137 en sedimentos, por espectrometría gamma, en dos sitios de muestreo ubicados en San Juan la Laguna y en Santiago Atitlán, encontrándose concentraciones que no representan riesgo para la población o la vida acuática y que constituyen la línea base para el monitoreo de la radiactividad en el Lago de Atitlán. Los resultados de plomo-210 y radio-226 también permitieron establecer que el sitio de muestreo ubicado en Santiago Atitlán, presentan potencial para el fechamiento de núcleos de sedimentos para la evaluación de los cambios ambientales en la cuenca.

Se analizaron por espectrofotometría de absorción atómica, arsénico y mercurio, en muestras de agua del Lago de Atitlán. Un hallazgo importante, es la presencia de arsénico en el agua del Lago de Atitlán, tributarios y en la planta de tratamiento, en niveles superiores a 20 $\mu\text{g/L}$, lo cual debería considerarse para el manejo de

las aguas del lago de Atitlán, en vista que hay propuestas para exportar las aguas residuales hacia afuera de la cuenca, lo cual provocaría la contaminación por arsénico de otros ecosistemas. Se detectaron tres fármacos en muestras de agua del lago (desketoprofeno, ibuprofeno y diclofenaco), aunque en niveles no cuantificables por encontrarse en concentraciones por debajo del límite de detección para la metodología empleada por cromatografía de líquidos de alta resolución (HPLC).

Se analizó el fitoplancton en cuatro sitios de muestreo, detectándose 11 géneros, encontrándose seis géneros en los cuatro sitios y los otros cinco, distribuidos en tres de los cuatro sitios de muestreo. El género más abundante fue *Aulacoseira*, diatomea colonial filamentosa, que se encontró en los cuatro sitios de muestreo. *Limnographis*, cianobacteria que ha sido responsable de floraciones extensivas en el lago, se encontró en dos sitios de muestreo.

Los resultados indican que la contaminación del Lago de Atitlán se debe en gran parte a la descarga de aguas residuales, especialmente en lo referente a nutrientes. La geología de la cuenca contribuye también a los niveles cuantificables de arsénico, que son superiores a niveles recomendados para agua potable en varias regulaciones.

Palabras clave:

Aguas residuales, Contaminantes emergentes, contaminantes radiactivos, fármacos, metales pesados, Lago Atitlán.

2. ABSTRACT

In this study pollution levels by radionuclides, toxic metals and emerging contaminants in Lake Atitlan, were investigated in collaboration with the Authority for the Sustainable Management of Lake Atitlan and its Surroundings (AMSCLAE). Four samplings were conducted in March, May, August and October 2014, collecting samples of water, fish and sediment at 14 sampling sites. Other physicochemical parameters defining water quality and profiles of pH, temperature and dissolved oxygen were measured.

Profiles of dissolved oxygen showed that the lake has good levels of oxygenation to 30 m depth, which is good for aquatic life. Slightly alkaline pH levels were found, as in previous studies. As for nutrient levels, it was found that concentrations of nitrates and nitrites nitrogen are not high enough to pose a threat to human health and aquatic life. Phosphate phosphorus was found in normal levels at concentrations that in combination with other environmental factors as temperature, could favor algal blooms. It was found that the levels of nutrients in

Quiscab and San Francisco rivers are higher than in the lake, as are the levels found in Plant Wastewater Treatment "The Cebollales" located in Panajachel, indicating that discharges of sewage into the lake remain an important source of nutrients in Lake Atitlan.

It was possible to determine the levels of the natural radionuclides lead-210 and radium-226 and the artificial radionuclide cesium-137 in sediments from two sampling sites, the first one located at San Juan la Laguna and the other one at Santiago Atitlan. The radionuclides were found in activity concentrations that do not represent risk to the human health or aquatic life and constitute the baseline for monitoring the radioactivity in Lake Atitlan. The results of lead-210 and radium-226 also helped to establish that the sampling site located at Santiago Atitlan, has good conditions for the dating of sediment cores for evaluating environmental changes in the basin.

Arsenic and mercury in water samples of Lake Atitlan were analyzed by atomic absorption spectrophotometry. Presence of arsenic was found in the water of Lake Atitlan, rivers and the wastewater treatment plant, above 20 µg/L. This should be considered for the management of the waters of Lake Atitlan, given that there are proposals to export waste water out of the basin, which would cause arsenic contamination of other ecosystems. It was not possible to quantify three pharmaceutical products analyzed in water samples from the lake, in concentrations below the detection limit for the methodology used by high performance liquid chromatography (HPLC).

The results indicate that contamination of Lake Atitlan is due in large part to the discharge of wastewater, especially regarding nutrients. Basin geology also contributes to quantifiable levels of arsenic, which are higher than recommended levels for drinking water in different regulations.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

7.1 Descripción del problema

El Lago de Atitlán se ha visto deteriorado en los últimos años, en forma drástica, debido a las actividades humanas desarrolladas sin las medidas de mitigación necesarias para la conservación del entorno. En estudios anteriores se han encontrado niveles elevados de contaminación por nutrientes, sobre todo en los alrededores de las principales poblaciones, que han provocado los florecimientos extensivos de la cianobacteria *Lyngbya* sp. (Oliva, Pérez, del Cid, Martínez & Valladares, 2010; Oliva, Pérez & Valladares, 2011), por lo que en el presente

proyecto se determinarán los niveles de nutrientes para evaluar los cambios en el tiempo y la efectividad de las medidas de mitigación adoptadas por AMSCLAE. Es evidente el daño causado a la calidad del agua por la descarga de aguas residuales sin tratamiento, lo cual pone en peligro la salud y el nivel de ingresos de los habitantes de la cuenca, que dependen en buena medida de la actividad turística.

Entre las descargas de aguas residuales, se encuentran las de aguas hospitalarias y de aguas domésticas, que arrastran contaminantes emergentes, como fármacos y surfactantes, los cuales serán evaluados en el presente proyecto en el Lago de Atitlán. A la fecha, se desconocen los niveles de contaminantes emergentes, entre ellos antibióticos y analgésicos de uso común y que por su uso excesivo y descarte sin control en Guatemala, pueden acumularse en diferentes compartimentos ambientales, incrementando el riesgo para la biota acuática y para el ser humano por el consumo de agua y pescado.

Por otra parte, se determinaron los niveles de contaminantes radiactivos en el Lago de Atitlán, los cuales son desconocidos en los ecosistemas acuáticos de Guatemala. Estos contaminantes, entre los que se encuentran el ^{137}Cs , el ^{226}Ra , los isótopos del plutonio, han sido liberados al ambiente a escala global a partir de las pruebas de armas nucleares de los años 1960 y en accidentes nucleares como los ocurridos en Chernobyl, Ucrania, en 1986, y en Fukushima, Japón, en 2011. Estos radionucleidos al ingresar a la cadena trófica, pueden llegar hasta el ser humano representando un riesgo para la salud y la integridad genética.

7.2 Definición del problema

El problema a investigar es el riesgo para el ecosistema acuático del Lago de Atitlán y la población humana de la cuenca del lago por la presencia de contaminantes emergentes y radiactivos.

Surge a partir de las preguntas de investigación:

¿Cuáles son los niveles de contaminantes emergentes y radiactivos en el Lago de Atitlán?

¿Representan un riesgo para la salud humana y los ecosistemas los niveles de contaminantes emergentes y radiactivos en el Lago de Atitlán?

7.3 Justificación

En el presente proyecto se investigaron los niveles de contaminantes emergentes y radiactivos en el Lago de Atitlán, los cuales eran desconocidos a la fecha y se presumía su presencia en el ecosistema acuático del lago, por las descargas de aguas domésticas y residuales, que arrastran restos de fármacos (antibióticos, antipiréticos, analgésicos), en el caso de los contaminantes emergentes, y por la

distribución global de los contaminantes radiactivos en los accidentes nucleares y uso de radioisótopos en la industria y la medicina a escala local. Los resultados permitirán a la Autoridad para el Manejo Sustentable del Lago de Amatitlán y su Entorno (AMSCLAE), la toma de decisiones en relación con la educación ambiental, el mejoramiento de reglamentos de calidad ambiental, el tratamiento de aguas residuales y la concienciación de la población en la cuenca, para la reducción de la contaminación en el Lago de Atilán, que repercute económicamente en el bienestar económico de la población del departamento de Sololá.

Los resultados de los niveles de contaminantes radiactivos constituyen la línea base para la evaluación de la efectividad de la legislación ambiental y el impacto de eventos de contaminación que ocurran en el futuro, permitiendo evaluar el riesgo para el ecosistema acuáticos y la salud de los habitantes de la cuenca.

En vista que la determinación de contaminantes emergentes y radiactivos requiere de instrumentación moderna para su estudio, AMSCLAE no estaba en la capacidad de realizar estudios de este tipo y la Universidad de San Carlos, que entre sus objetivos se encuentra el de contribuir a la solución de los problemas nacionales, cuenta con equipo y personal capacitado para realizar este tipo de estudios en beneficio del medio ambiente, la sociedad y del lago de Atilán en particular.

4. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

Los contaminantes emergentes son cualquier compuesto químico, natural o sintético, con el potencial para introducirse en el medio ambiente causando daños ecológicos adversos y daños a la salud humana, que hasta recientemente se habían ignorado. Son contaminantes no regulados, tales como productos farmacéuticos y de higiene o cuidado personal (Pharmaceuticals and Personal Care Products –PPCPs-), así como ciertos tensoactivos y aditivos de la gasolina, los cuales contribuyen a la toxicidad del agua residual. La principal característica de estos contaminantes es que no es necesario que persistan en el ambiente para causar daños negativos, si no que debido al uso constante de los mismos, se mantiene su concentración en los cuerpos de agua. Ejemplos de esta situación son las pequeñas cantidades de productos utilizados en la actividad diaria, desde la ingesta de cafeína, uso de hormonas, antibióticos como inflamatorios, residuos de cosméticos, nicotina y otros, que son vertidos diariamente y que sobrepasan las capacidades de depuración (Leonart, 2009; Barceló et al., 2009; Muñoz et al., 2008).

Entre los contaminantes emergentes se encuentran miles de sustancias usadas en prescripción de drogas como antibióticos, tranquilizantes, contraceptivos, beta bloqueadores, etc. (ver cuadro de contaminantes emergentes en anexos), que representan un riesgo significativo, vía el ambiente acuático, según la Unión Europea (Unión Europea, 2000; Muñoz et al., 2008) y aunque sus concentraciones son muy bajas (ng/L), estas concentraciones pueden ser suficientes para causar

daños al medio, lo que ha elevado e incrementado el interés sobre los riesgos que ellos tienen sobre los humanos y el ambiente (Lleonart, 2009; Muñoz et al., 2008). No se conocen todos los disruptores endocrinos existentes en el medio, y no se sabe si estos tendrán un efecto sinérgico o antagónico (Lleonart, 2009), pero si se puede establecer que su desconocimiento puede tener consecuencias a largo plazo (Lleonart, 2009; Muñoz et al., 2008).

3.2 Contaminación radiactiva

La contaminación radiactiva ha existido debido a eventos no accidentales y accidentales, siendo así:

3.2.1 Liberaciones de radionucleidos no accidentales

La primera prueba termonuclear se efectuó en el Océano Pacífico en 1952 provocando una distribución de lluvia radiactiva de radionucleidos a nivel global. En 1961-1962, los Estados Unidos y la Unión Soviética iniciaron con las pruebas de armas nucleares en la atmósfera, provocando que altas concentraciones de radionucleidos fueron localizadas por todo el hemisferio norte. Posteriormente se realizaron pruebas nucleares sobre la superficie terrestre conducidas principalmente por China y Francia, que provocaron niveles de radionucleidos aerotransportados en los años 1960-1980 (Gutiérrez, 1998). A nivel local, la disposición inadecuada de fuentes radiactivas utilizadas en la medicina y la industria, contaminan también el medio ambiente.

3.2.2 Liberaciones de radionucleidos accidentales

El accidente de Chernobyl se ha considerado como el mayor evento de liberación radiactiva. Este accidente ocurrió en 1986 y provocó la contaminación del medio ambiente a escala global, por radionucleidos artificiales como el Pu-239, el Cs-137 y I-131 (Gutiérrez, 1998). En 2011 ocurrió el accidente de la planta nuclear de Fukushima, Japón, en el cual se liberaron los radionucleidos Cs-137 y I-131 principalmente, del cual se encontraron niveles de precipitación radiactiva en el centro de Asia, en Estados Unidos y en Grecia, en abril y mayo de 2011, especialmente de ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{131}I (Bolsunovsky & Dementiev). Así mismo se han detectado altos niveles de ^{137}Cs en el ambiente marino en las cercanías de Japón (Buessler & Aoyama, 2011)

3.3 Calidad del agua

La calidad del agua se define dependiendo del fin al cual se destina, por lo que puede tener diferentes significados para diferentes personas. Así, la calidad del agua para consumo humano se define diferentemente de la calidad del agua de ecosistemas acuáticos. En el caso del Lago de Atitlán, son importantes los estándares para aguas naturales y los de descargas para aguas residuales, al descargarse estas directamente al lago o a través de sus tributarios. Los estándares de calidad del agua se definen en términos de los siguientes parámetros (Weiner, 2008):

a) composición química: concentraciones de metales, compuestos orgánicos, cloro, nitratos, fósforo, sulfatos, amonio, etc.

- b) Propiedades físicas y químicas: Temperatura, alcalinidad, conductividad, pH, oxígeno disuelto, dureza, sólidos disueltos totales, demanda química de oxígeno.
- c) características biológicas: demanda bioquímica de oxígeno, *E. coli* conformes fecales, etc.
- d) Radionucleidos: Radio-226, radio-228, uranio, Rn, emisiones alfa y beta totales. Se han establecido niveles de radionucleidos en agua potable (OMS, 1989).

Para el propósito del presente estudio, son de importancia los radionucleidos naturales y artificiales, entre ellos isótopos del radio, Cs-137, I-131 y plutonio.

3.4 Evaluación de la contaminación radiactiva en Guatemala

Los principales estudios de contaminación radiactiva en el medio ambiente de Guatemala se realizaron en la década de 1990. En 1992 se determinó la actividad beta total y la actividad beta residual en suelos de 20 departamentos de la República, concluyéndose que existían radionucleidos emisores de partículas beta diferentes de los naturales como el ^{40}K . Se encontraron niveles de radiactividad beta residual de hasta 291 Bq/kg de suelo en Izabal (Pérez, 1993).

Se han encontrado niveles de ^{137}Cs en suelos desde no detectables (Concentración Mínima Detectable = 0.43 Bq/kg) en Chiquimula, hasta 7.56 Bq/kg en Alta Verapaz, lo que reflejó que los suelos de Guatemala habían sido afectados por los eventos de contaminación radiactiva a escala global, incluyendo el accidente de Chernobyl ocurrido en 1986 (Guillén & Pérez, 1996). Esto trajo para Guatemala, consecuencias de carácter económico, al exigirse por parte de varios países de la comunidad europea y árabes, la certificación de los niveles de radiactividad en productos agroindustriales, (Pérez & Ayala, 1996). Otros radionucleidos artificiales encontrados en los suelos de Guatemala fueron isótopos del plutonio, los cuales por ser emisores alfa presentan mayores daños en los organismos que los consumen (Gutiérrez, 1998).

Se ha evaluado también la contaminación radiactiva en el ambiente marino, habiéndose cuantificado los niveles de $^{239/240}\text{Pu}$ (2-10 mBq/kg) y ^{137}Cs (2-8 Bq/kg) en sedimentos de los océanos Pacífico y Atlántico de Guatemala (Pérez, Oliva & Aguilar, 1998), lo que demostró que la contaminación radiactiva en Guatemala había ocurrido tanto a nivel continental como marino.

5. OBJETIVOS

4.1. General

Evaluar los niveles de contaminantes emergentes y radiactivos en agua, sedimentos y organismos de diferentes niveles tróficos en el Lago de Atitlán.

4.2. Específicos

4.2.1 Determinar los niveles de contaminantes emergentes (seis fármacos) en agua y sedimentos del lago de Atitlán y sus principales afluentes.

4.2.2 Determinar los niveles de radionucleidos emisores gamma, naturales y artificiales (^{137}Cs , ^{210}Pb , ^{226}Ra) en sedimentos del Lago de Atitlán.

4.2.3 Determinar los niveles de metales ecotóxicos: plomo y mercurio, en agua del lago de Atitlán.

4.2.4 Determinar los niveles de nutrientes (especies inorgánicas de nitrógeno y fósforo) y la calidad fisicoquímica del agua del lago de Atitlán y sus afluentes.

4.2.5 Determinar la abundancia de fitoplancton y sus variaciones estacionales en el lago de Atitlán.

6. HIPÓTESIS

Existen concentraciones detectables de contaminantes emergentes (fármacos) y radiactivos en el Lago de Atitlán.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1 Selección de Puntos de Muestreo

Se seleccionaron 12 sitios de muestreo en el lago de Atitlán tomando como base las estaciones de muestreo de un proyecto anterior (Oliva *et al.*, 2010) en acuerdo en la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Atitlán y su Entorno -AMSCLAE-, para poder comparar resultado del presente proyecto con los de estudios anteriores. Estos se listan en el cuadro 1:

7.2 Toma y transporte de muestras:

En todos los sitios se tomaron muestras de agua superficial para análisis químicos utilizando botellas de polipropileno de 1 L a una profundidad de 30 cm. En cada sitio se tomaron tres muestras, 2 de 1 L para el análisis de nutrientes y sólidos sedimentables, y la tercera para el análisis de DQO, la cual se acidificó una hasta pH 2. Las muestras fueron transportadas al laboratorio en hieleras a una temperatura aproximada de 4°C.

Cuadro1. Sitios de muestreo en el Lago de Atitlán.

No.	Nombre	Posición N	Posición W
1	Frente a río Quiscab	14°44.405´	91°11.055´
2	Centro del Lago	14°42.537´	91°10.492´
3	Jaibalito	14°44.072´	91°13.152´
4	Bahía San Pablo, San Juan- San Pedro	14°42.283´	91°16.714´
5	San Pedro la Laguna	14°41.618´	91°15.887´
6	Santiago Atitlán	14°38.577´	91°13.925´

7	San Lucas Tolimán	14°38.307´	91°08.276´
8	Tzanpetey	14°39.803´	91°07.067´
9	Santa Catarina Palopó	14°43.034´	91°08.153´
10	Panajachel	14°43.941´	91°09.603´
11	Río San Francisco	14°43.941´	91°09.603´
12	Río Quiscab	No determinado*	No determinado*

*A 200 metros arriba de la desembocadura.

Las muestras de agua para análisis de fármacos se colectaron en botellas de vidrio color ámbar en los ríos Quiscab y San Francisco, y la planta de tratamiento Los Cebollales. En cada sitio de muestreo se colectarán datos de campo: pH, conductividad, temperatura, oxígeno disuelto con un medidor multiparamétrico portátil así como la transparencia usando un disco de Secchi (APHA, AWWA & WEF, 2006). Las muestras de sedimento superficial fueron colectadas utilizando una draga Ekman, almacenándose el sedimento en bolsas plásticas de una arroba.

7.3 Mediciones en el laboratorio

Los parámetros nitrógeno total, nitrógeno de nitritos, nitrógeno de nitratos y nitrógeno de amonio, fósforo total y fósforo de ortofosfatos, sólidos sedimentables, sólidos totales, sólidos disueltos y sólidos suspendidos, sulfatos, fueron determinados en el laboratorio, de acuerdo a los procedimientos del "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" (APHA, AWWA & WEF, 2006). Los metales (arsénico y mercurio) se analizaron por espectrofotometría de absorción atómica. Los contaminantes emergentes (fármacos de uso común: acetaminofen, cafeína, desketoprofeno, diclofenaco sódico, fenilefrina e ibuprofeno) fueron extraídos por Extracción en Fase Sólida (SPE) y elución con metanol para ser determinados por HPLC.

7.4 Identificación y conteo de fitoplancton

Las muestras para identificar el fitoplancton se colectaron con una red con un tamaño de poro de 20 µm, haciendo pasar 100 L de agua por la red y colectando 100 mL en un recipiente que las proteja de la luz. Las muestras se fijan con formalina y lugol para preservarlas. La identificación del fitoplancton se realiza utilizando una cámara de Sedgwick-Rafter de 1.0 mL. La identificación del fitoplancton se realiza utilizando claves dicotómicas apropiadas.

7.5 Análisis de radionucleidos en agua y sedimentos

Los radionucleidos naturales y artificiales emisores gamma fueron analizados en sedimentos. El análisis de ¹³⁷Cs y ²¹⁰Pb y otros radionucleidos emisores gamma, en sedimentos se realizó por medición directa del sedimento seco en tubos de plástico de geometría cilíndrica de 1.5 cm de diámetro y 8 cm de altura en un detector de germanio hiperpuro de geometría de pozo (Last & Smol, 2001).

7.6 Definición de las variables: tipos y formas de análisis de las variables

Variables dependientes: Las variables dependientes son las concentraciones parámetros de calidad fisicoquímica, contaminantes emergentes y radiactivos, metales y microorganismos, en el agua y sedimentos del Lago de Atitlán.

Variables independientes: Las variables independientes son los sitios y los meses de muestreo en el Lago de Atitlán durante 2014.

7.7 Metodología de análisis de la información

Los análisis químicos del agua del Lago de Atitlán, se realizaron por duplicado, en las muestras colectadas, una por sitio para los diferentes parámetros analizados.

En el caso de las mediciones de radionucleidos, ya que la desintegración radiactiva sigue una distribución estadística de Poisson se realizó una sola medición de 172,800 s en los sedimentos colectados en la Bahía de Santiago Atitlán y frente a Cristalinillas en San Juan la Laguna.

8. RESULTADOS

8.1 Determinación de la calidad del agua en el Lago de Atitlán

8.1.1 Parámetros fisicoquímicos de campo:

POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH), medido en 12 sitios de muestreo en el Lago de Atitlán, durante el mes de marzo de 2014.

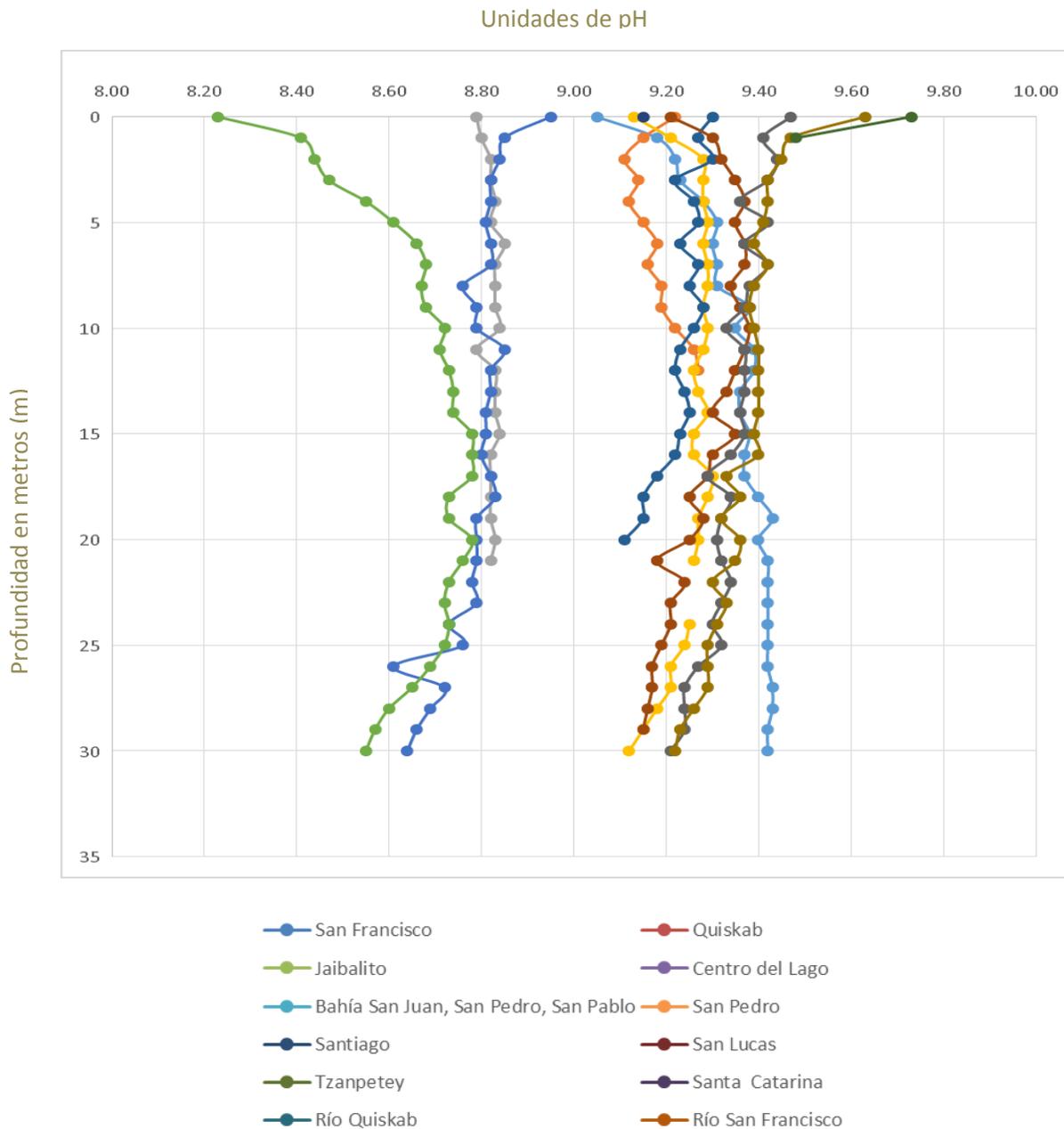


Figura 1. Perfil de pH en sitios del Lago de Atitlán hasta 30 m durante el primer muestreo (marzo 2014)

POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH), medido en 12 sitios de muestreo en el Lago de Atitlán, durante el mes de mayo de 2014.

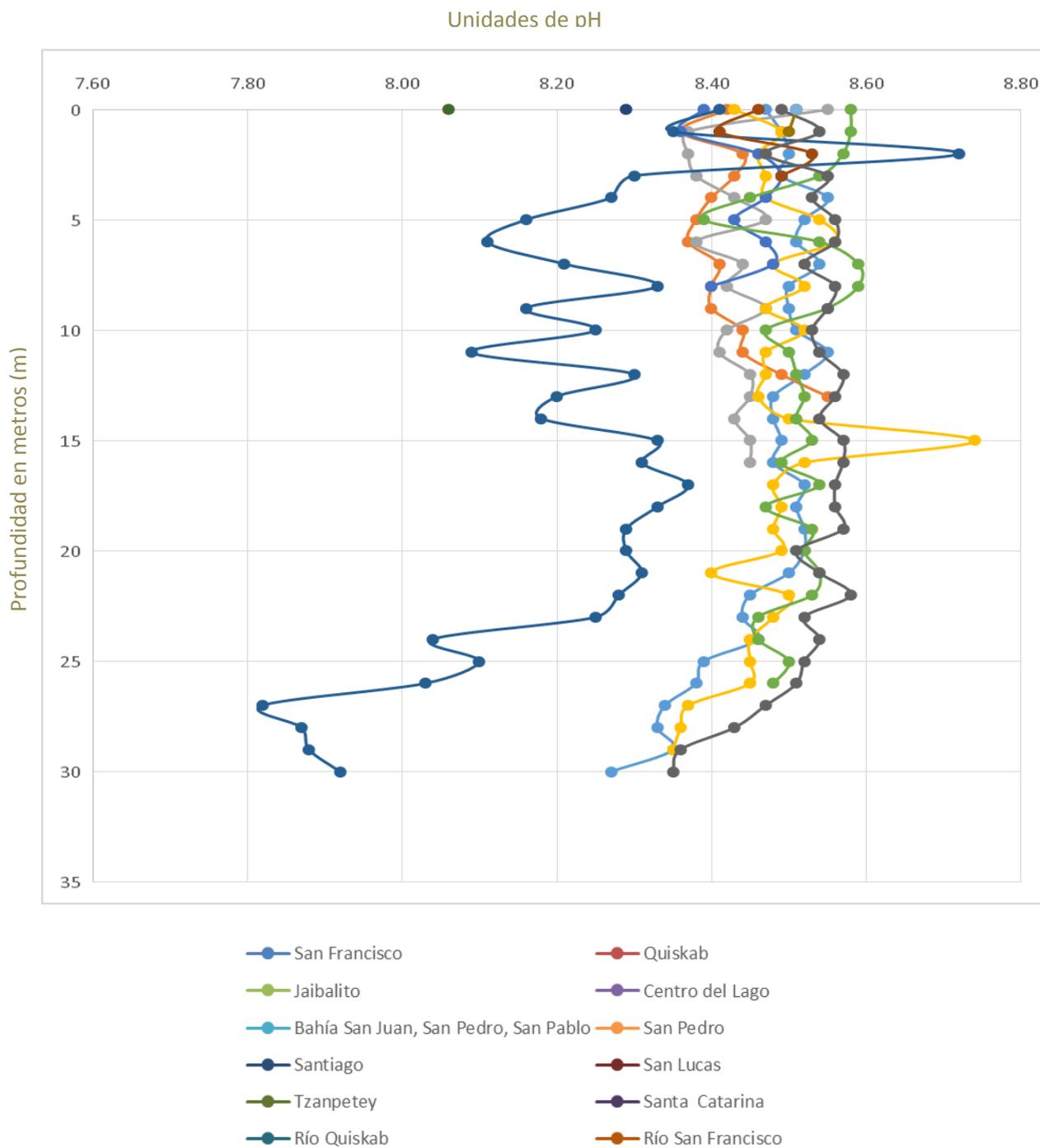


Figura 2. Perfil de pH en sitios del Lago de Atitlán hasta 30 m durante el segundo muestreo (mayo 2014)

POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH), medido en 12 sitios de muestreo en el Lago de Atitlán, durante el mes de agosto de 2014.

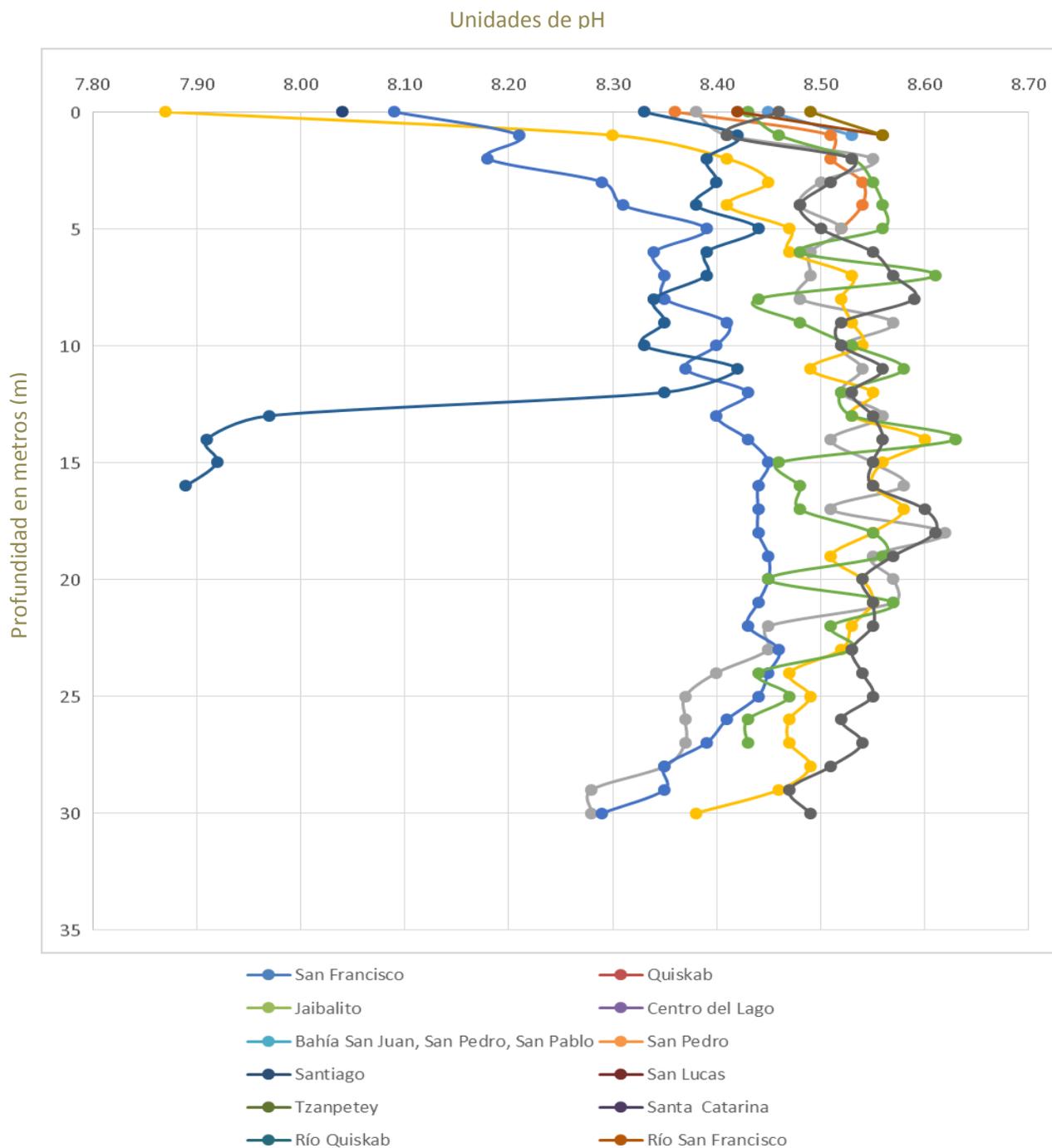


Figura 3. Perfil de pH en sitios del Lago de Atitlán hasta 30 m durante el tercer muestreo (agosto 2014)

POTENCIAL DE ÓXIDO-REDUCCIÓN (REDOX), medido en 12 sitios de muestreo en el Lago de Atitlán, durante el mes de marzo de 2014.

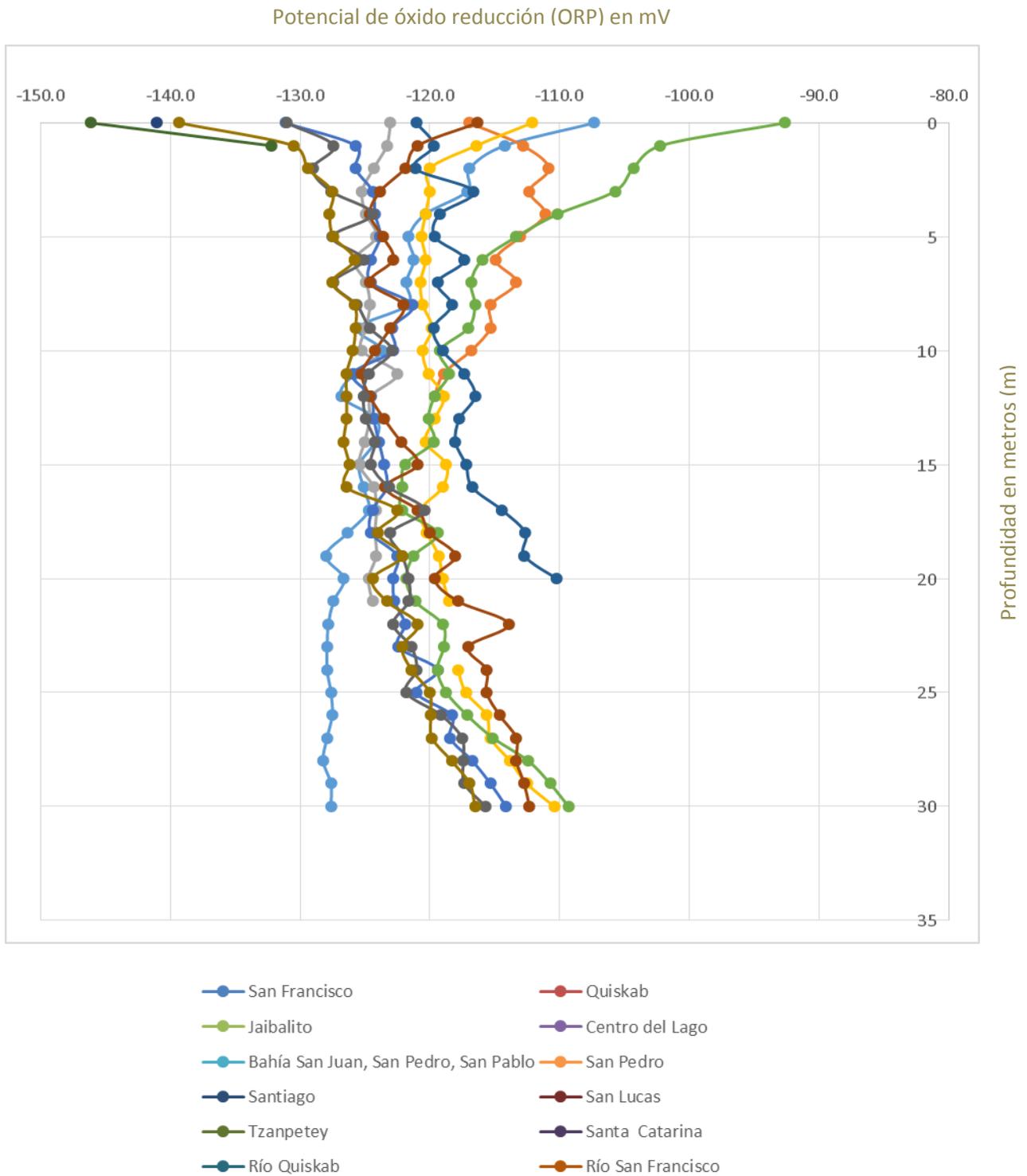


Figura 4. Perfil de oxido-reducción en sitios del Lago de Atitlán hasta 30 m durante el primer muestreo (marzo 2014)

POTENCIAL DE ÓXIDO-REDUCCIÓN (REDOX), medido en 12 sitios de muestreo en el Lago de Atitlán, durante el mes de mayo de 2014.

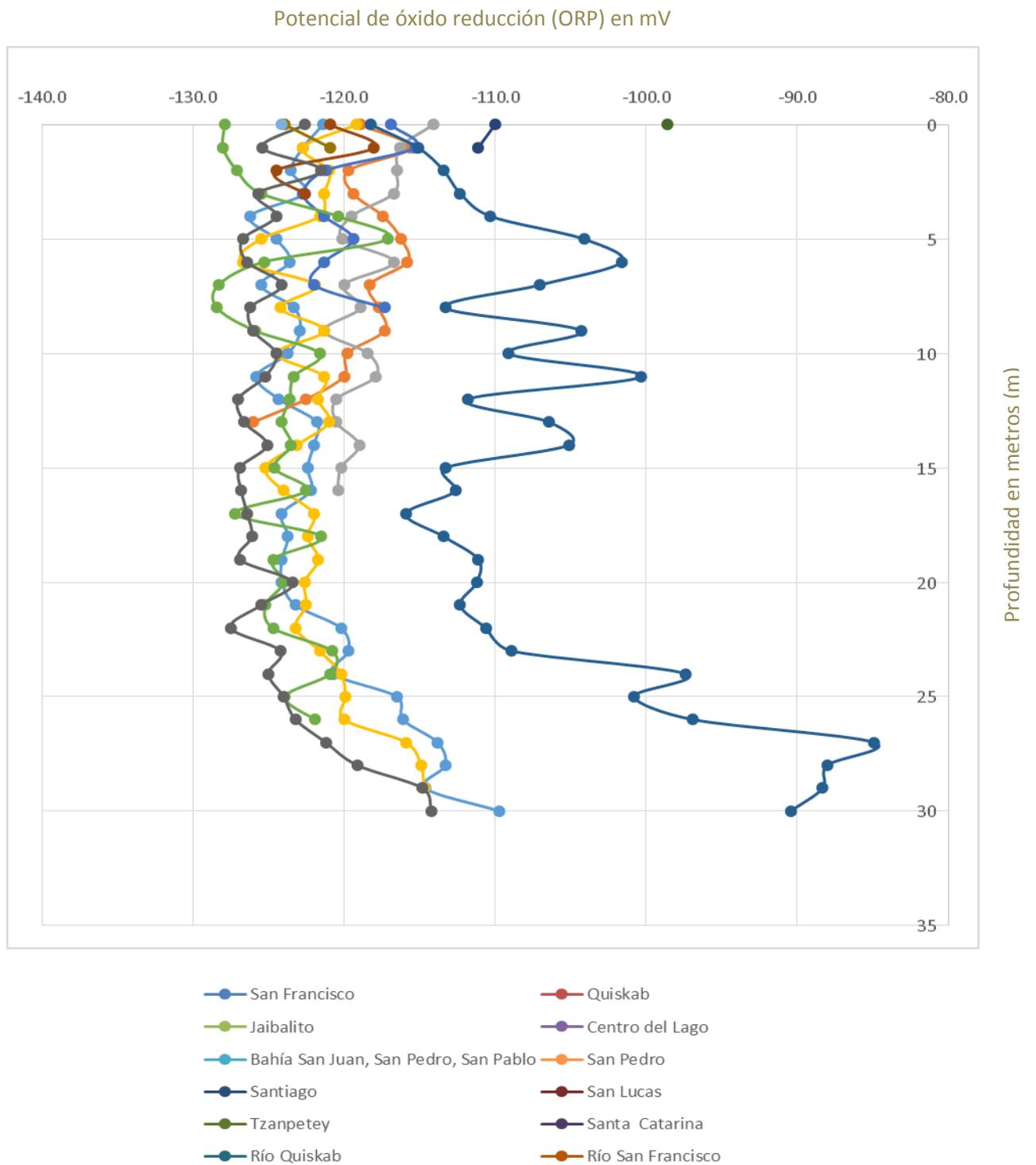


Figura 5. Perfil de oxido-reducción en sitios del Lago de Atitlán hasta 30 m durante el segundo muestreo (mayo 2014)

POTENCIAL DE ÓXIDO-REDUCCIÓN (REDOX), medido en 12 sitios de muestreo en el Lago de Atitlán, durante el mes de agosto de 2014.

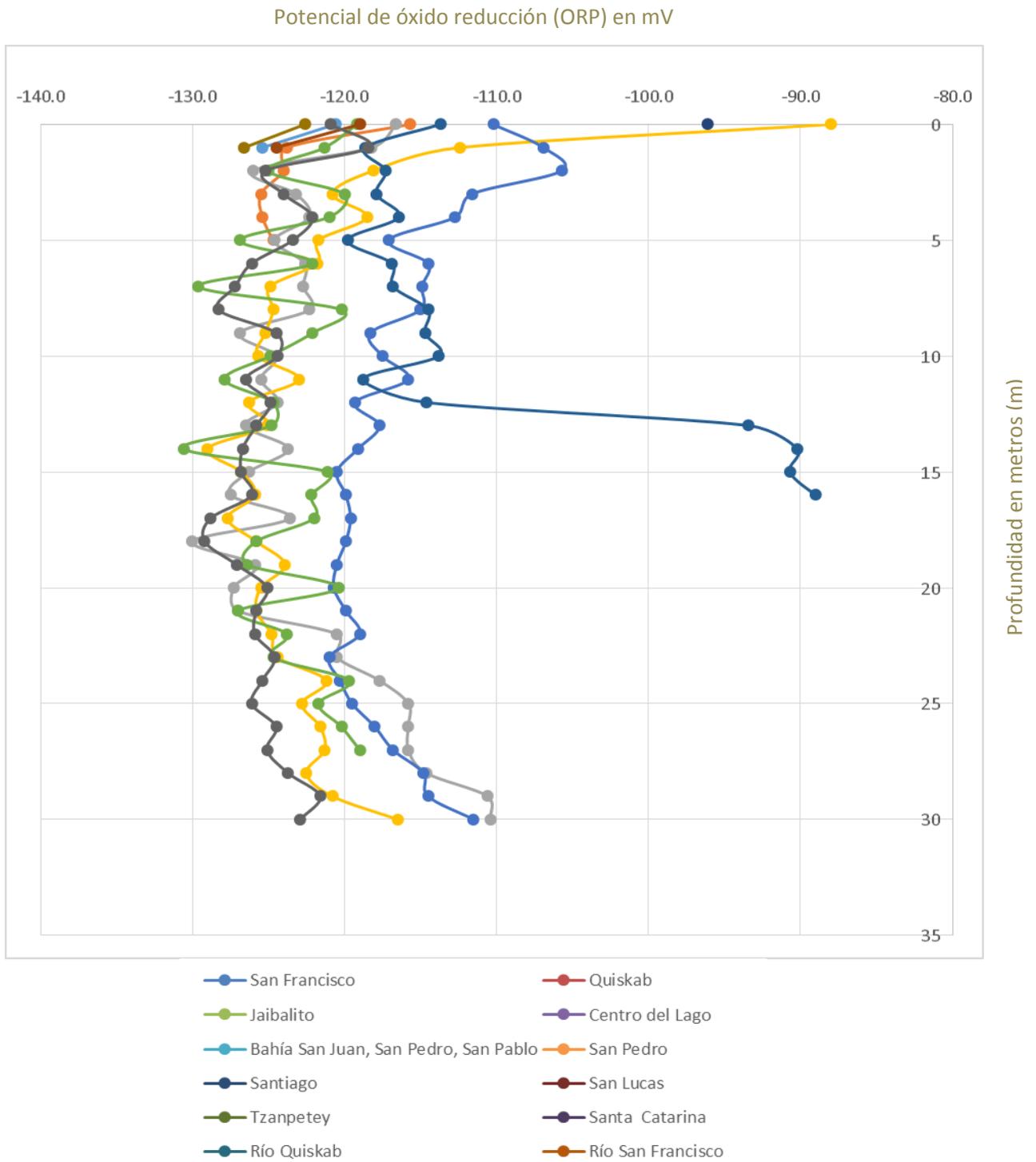


Figura 6. Perfil de oxido-reducción en sitios del Lago de Atitlán hasta 30 m durante el tercer muestreo (agosto 2014)

TEMPERATURA DEL AGUA, medida en 12 sitios de muestreo en el Lago de Atitlán, durante el mes de marzo de 2014.

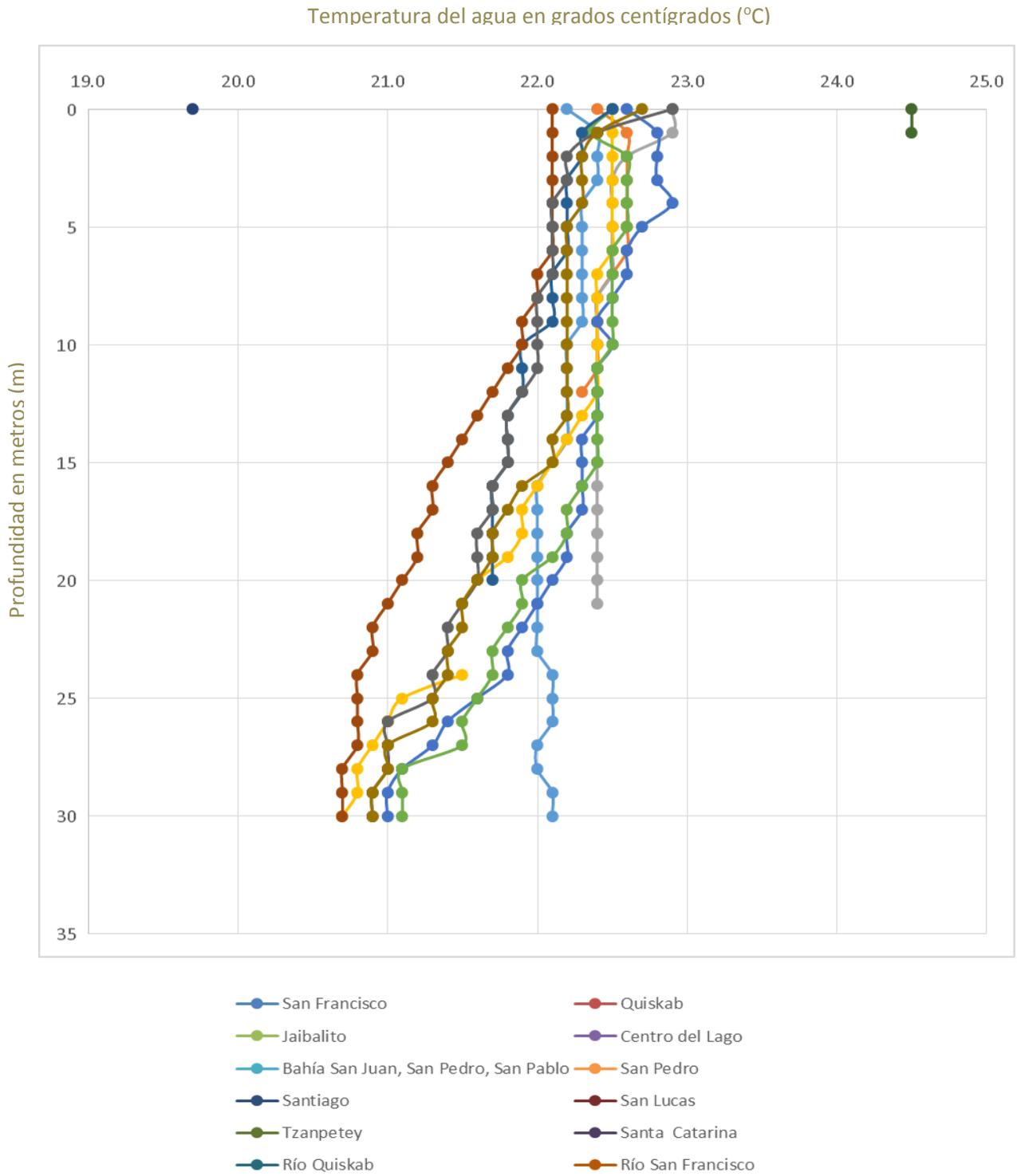


Figura 7. Perfil de temperatura en sitios del Lago de Atitlán hasta 30 m durante el primer muestreo (marzo 2014)

TEMPERATURA DEL AGUA, medida en 12 sitios de muestreo en el Lago de Atitlán, durante el mes de mayo de 2014.

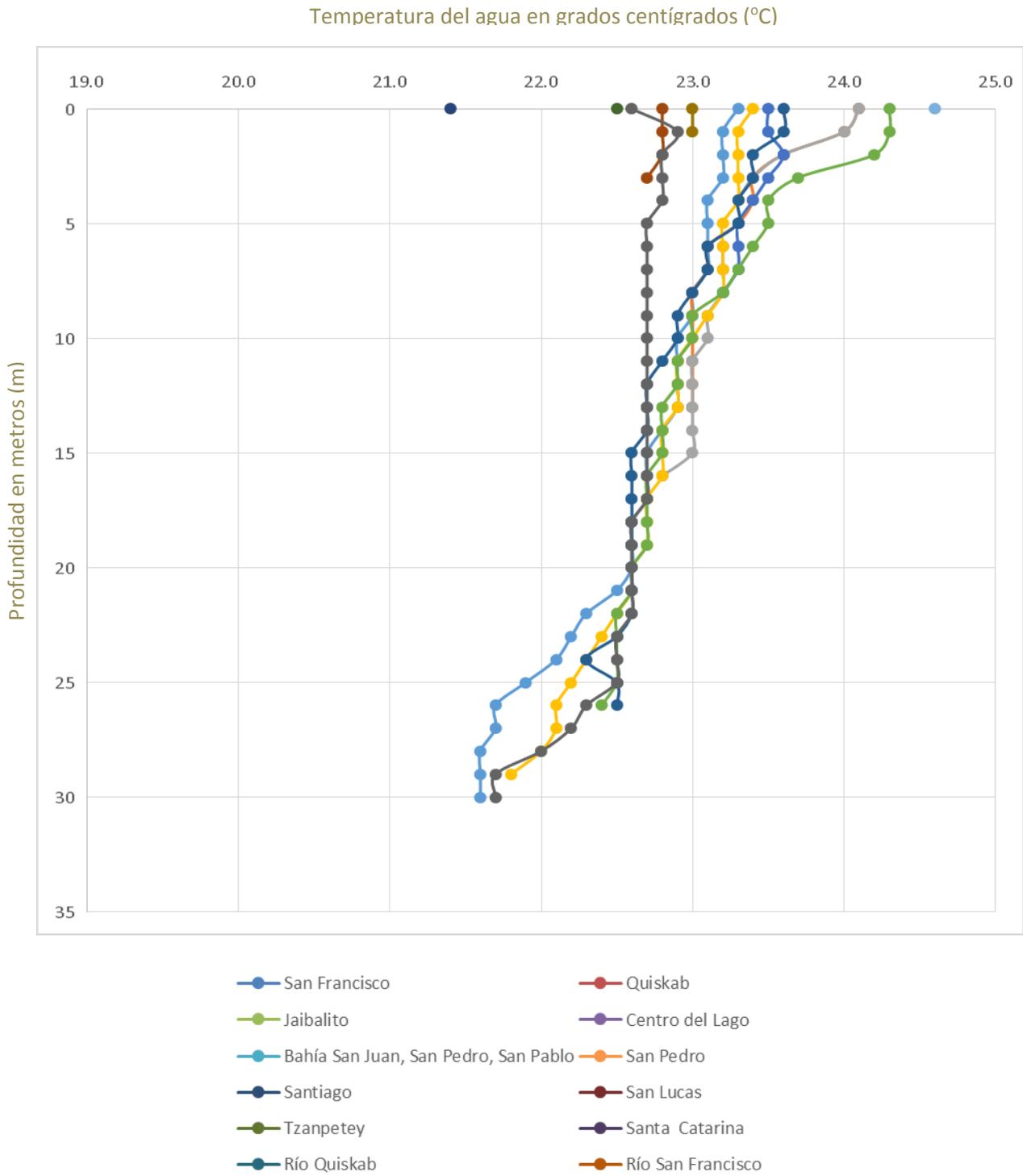


Figura 8. Perfil de temperatura en sitios del Lago de Atitlán hasta 30 m durante el segundo muestreo (mayo 2014)

TEMPERATURA DEL AGUA, medida en 12 sitios de muestreo en el Lago de Atitlán, durante el mes de agosto de 2014.

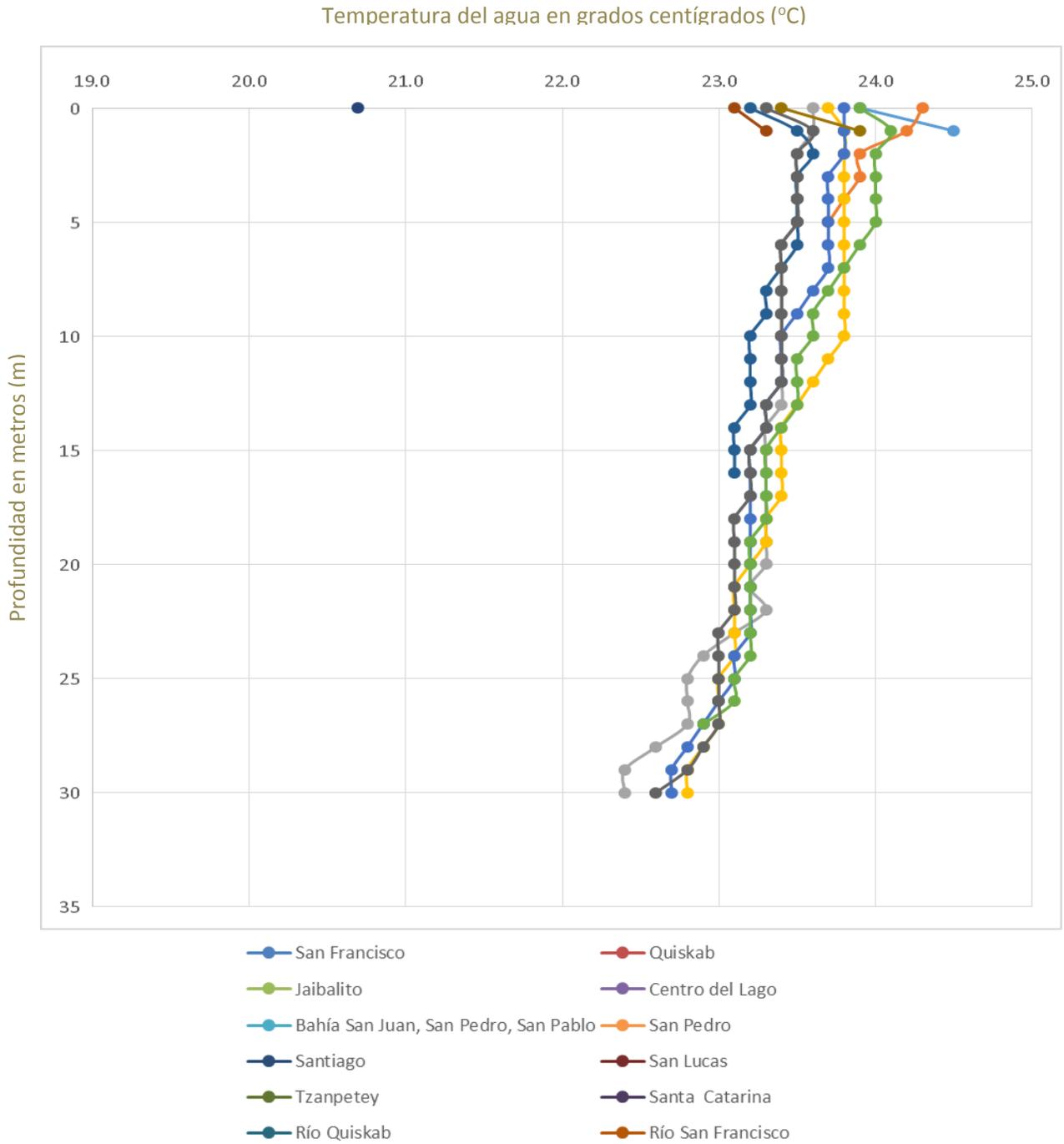


Figura 9. Perfil de temperatura en sitios del Lago de Atitlán hasta 30 m durante el tercer muestreo (agosto 2014)

OXÍGENO DISUELTO EN AGUA (en mg/L), medido en 12 sitios de muestreo en el Lago de Atitlán, durante el mes de marzo de 2014.

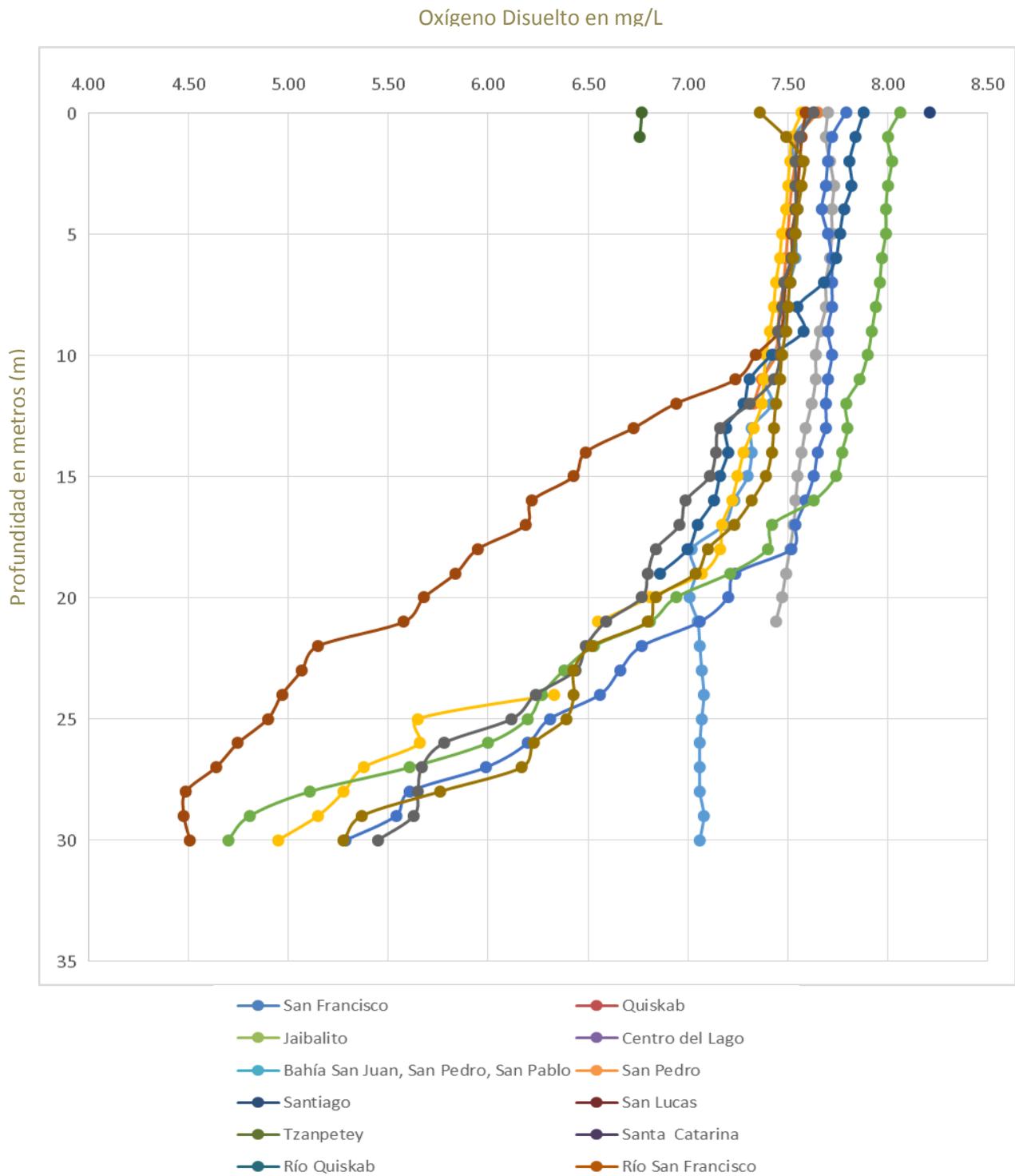


Figura 10. Perfil de oxígeno disuelto en sitios del Lago de Atitlán hasta 30 m durante el primer muestreo (marzo 2014)

OXÍGENO DISUELTO EN AGUA (en mg/L), medido en 12 sitios de muestreo en el Lago de Atitlán, durante el mes de mayo de 2014.

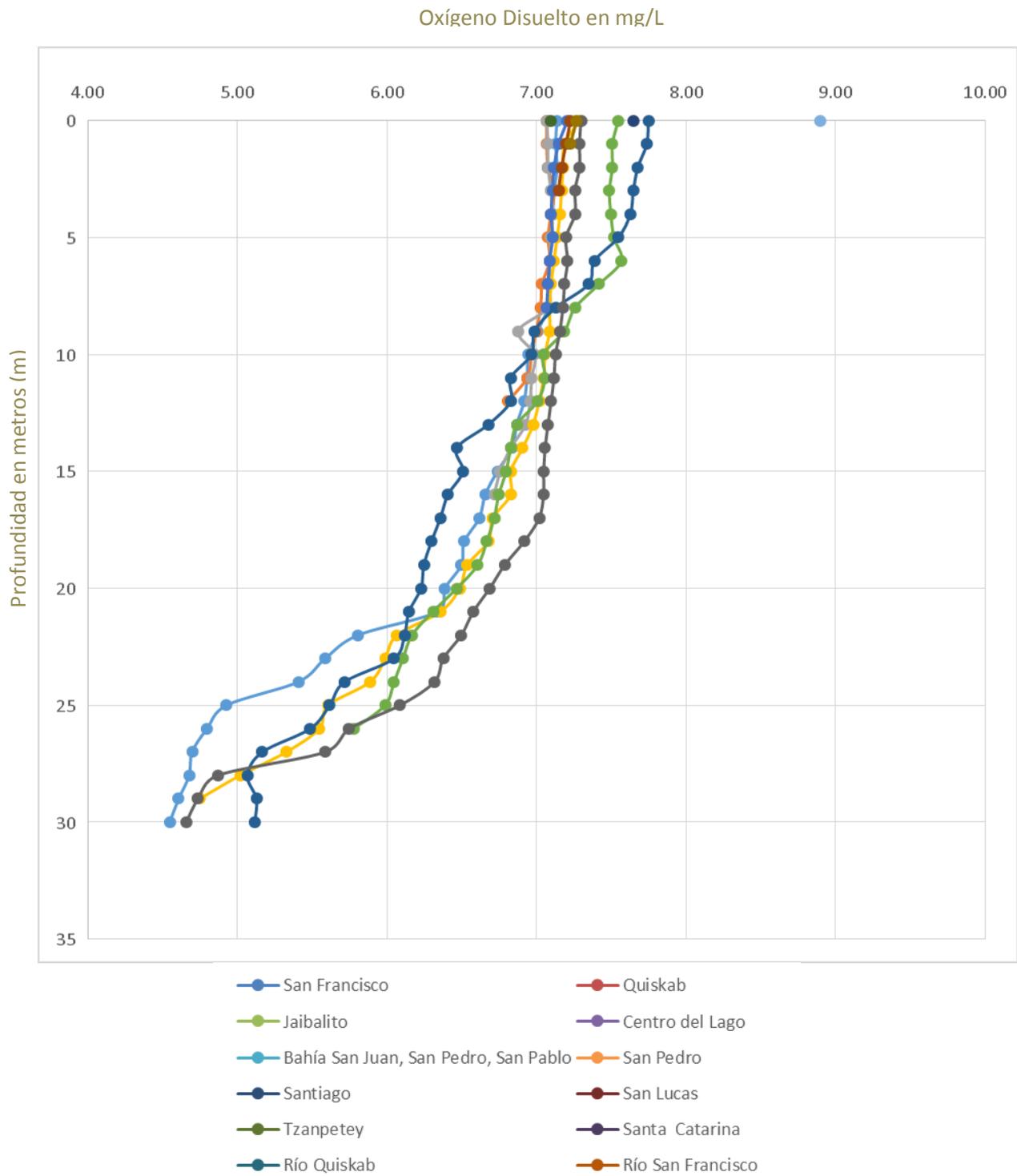


Figura 11. Perfil de oxígeno disuelto en sitios del Lago de Atitlán hasta 30 m durante el segundo muestreo (mayo 2014)

OXÍGENO DISUELTO EN AGUA (en mg/L), medido en 12 sitios de muestreo en el Lago de Atitlán, durante el mes de agosto de 2014.

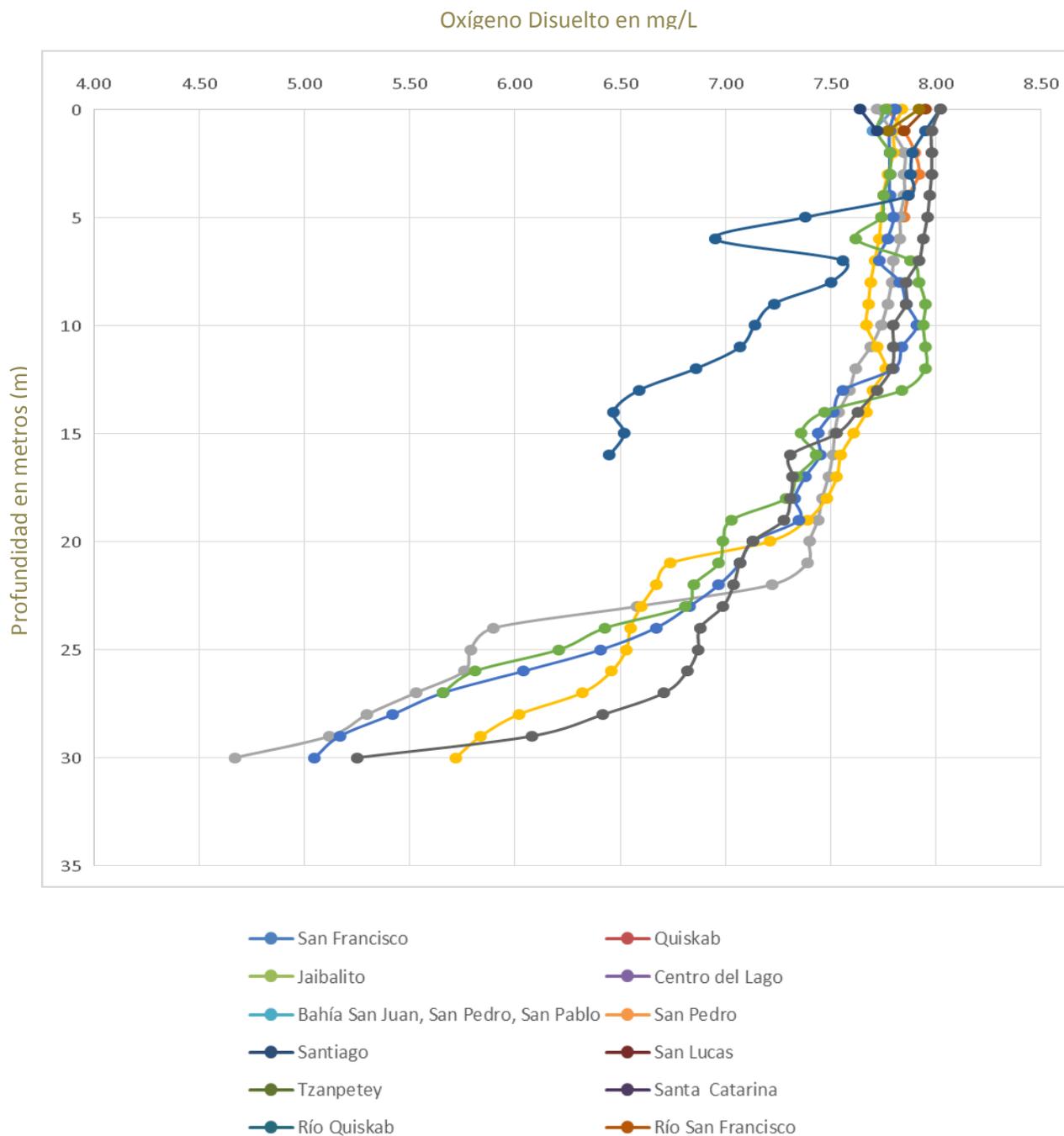


Figura 12. Perfil de oxígeno disuelto en sitios del Lago de Atitlán hasta 30 m durante el tercer muestreo (agosto 2014)

PORCENTAJE DE SATURACIÓN DE OXÍGENO DISUELTO EN AGUA, medido en 12 sitios de muestreo en el Lago de Atitlán, durante el mes de marzo de 2014.

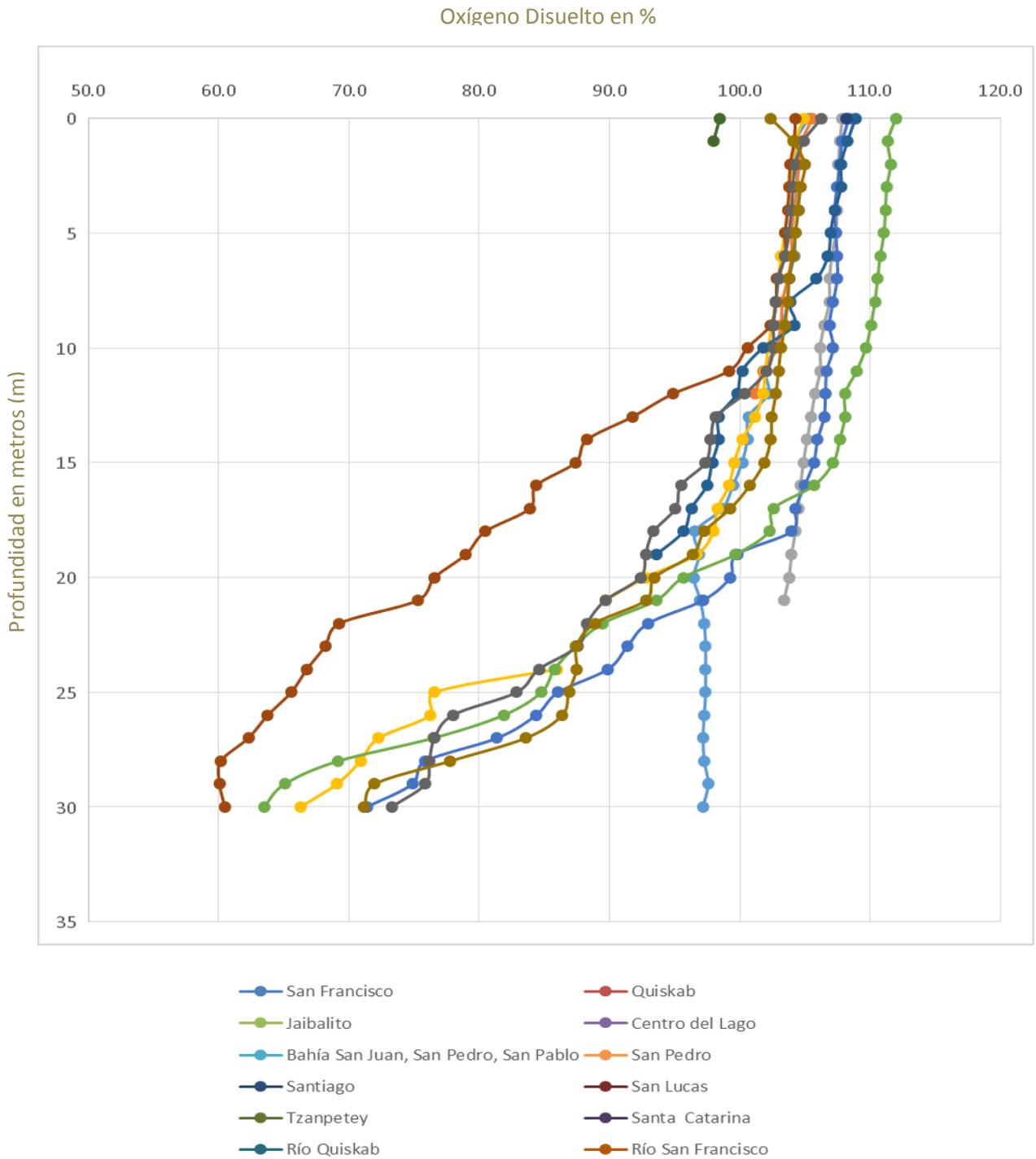


Figura 13. Perfil de saturación de oxígeno en sitios del Lago de Atitlán hasta 30 m durante el primer muestreo (marzo 2014)

PORCENTAJE DE SATURACIÓN DE OXÍGENO DISUELTO EN AGUA, medido en 12 sitios de muestreo en el Lago de Atitlán, durante el mes de mayo de 2014.

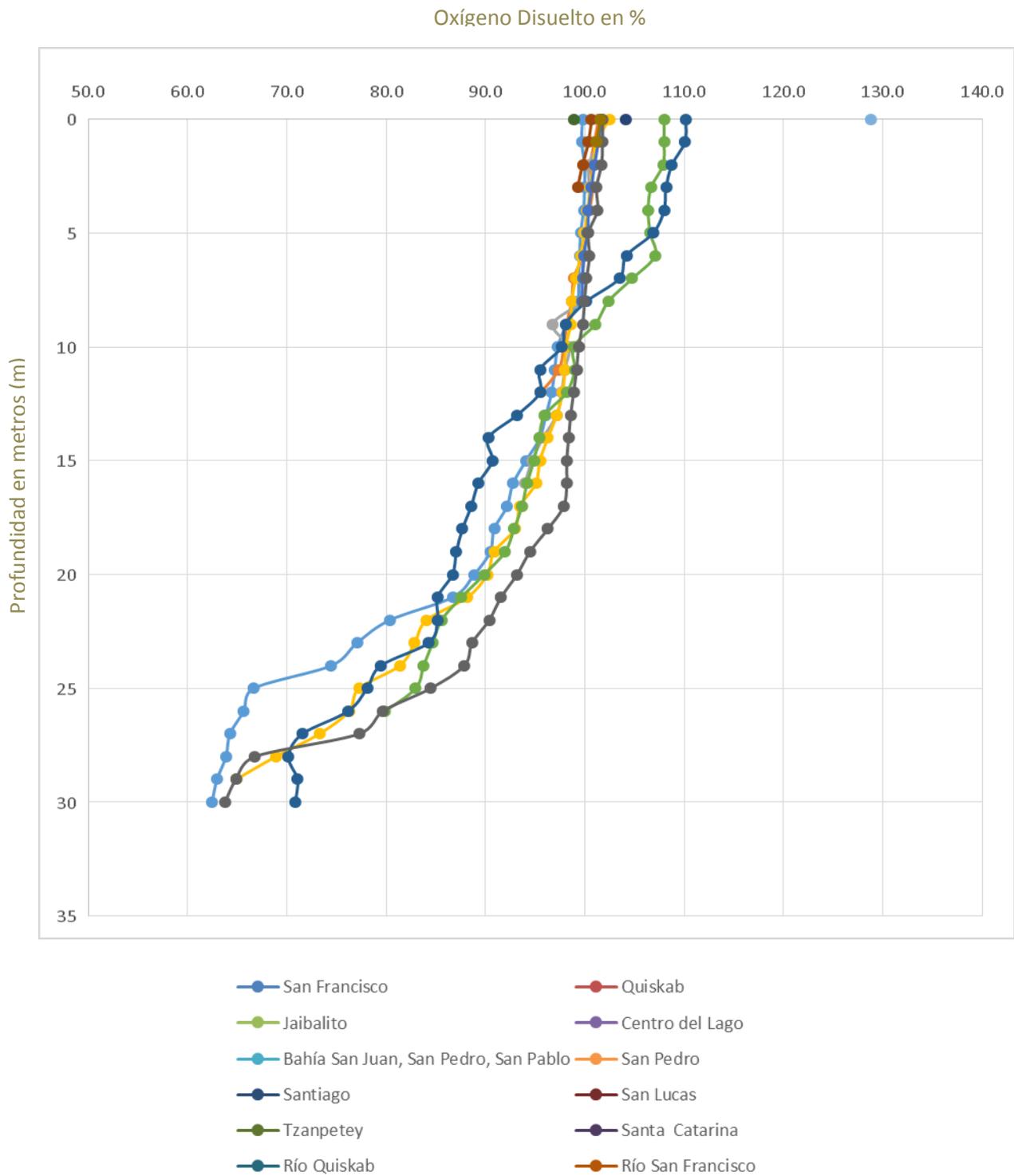


Figura 13. Perfil de saturación de oxígeno en sitios del Lago de Atitlán hasta 30 m durante el segundo muestreo (mayo 2014)

PORCENTAJE DE SATURACIÓN DE OXÍGENO DISUELTO EN AGUA, medido en 12 sitios de muestreo en el Lago de Atitlán, durante el mes de agosto de 2014.

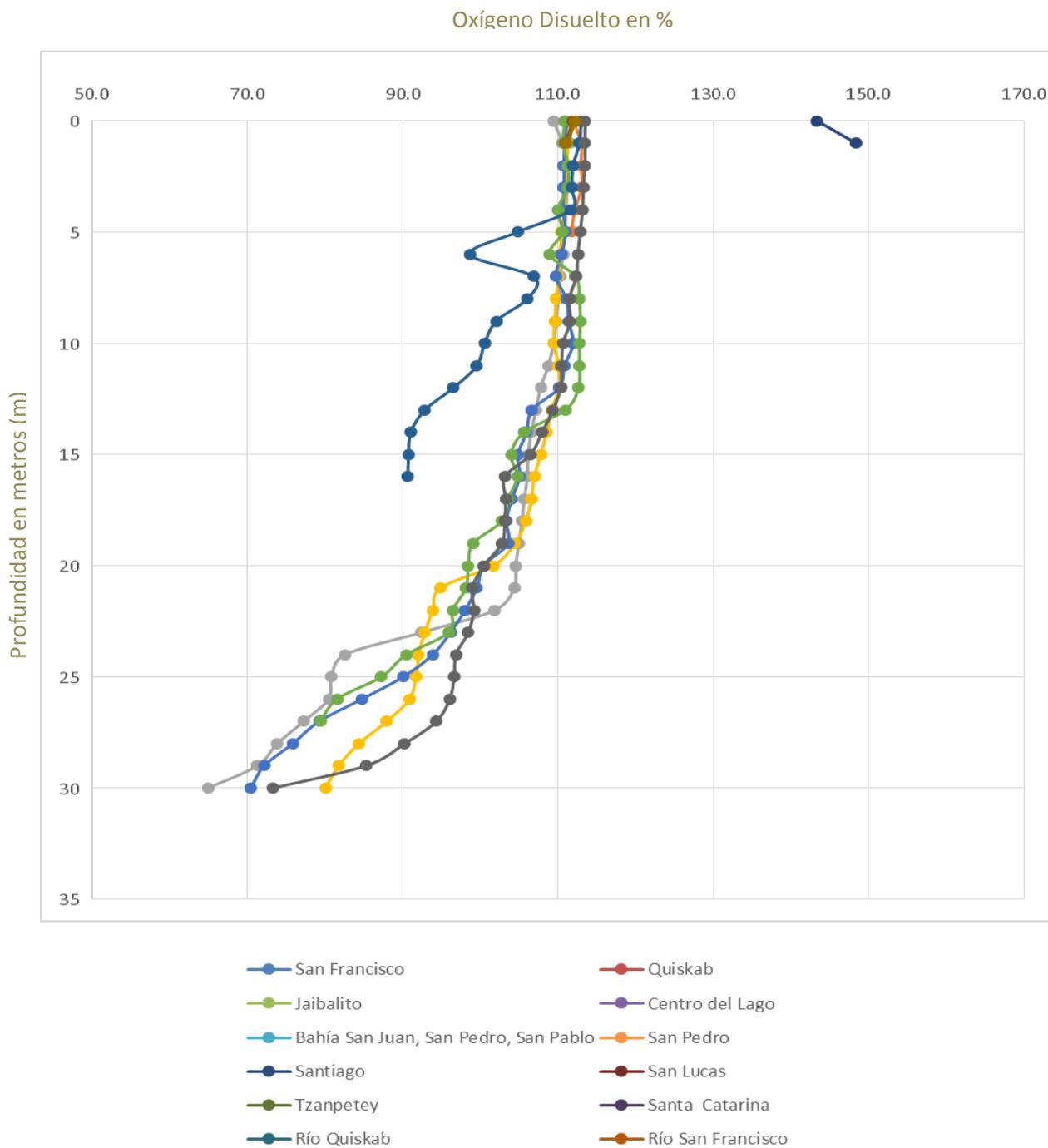


Figura 13. Perfil de saturación de oxígeno en sitios del Lago de Atitlán hasta 30 m durante el tercer muestreo (agosto 2014)

8.1.2 Niveles de nutrientes:

Tabla 1. Nitrógeno de nitratos en muestras del Lago de Atitlán durante cuatro muestreos realizados en 2014 (mg/L).

Sitio de muestreo	mar-14	may-14	ago-14	oct-14
Panajachel	0.039	0.023	0.014	0.058
Quiscab	0.028	0.014	0.023	0.033
Jaibalito	0.026	0.012	0.080	0.039
Centro Lago	0.030	0.018	0.018	0.032
Bahía	0.022	0.006	0.014	0.022
San Pedro	0.032	0.010	0.015	0.025
Santiago	0.028	0.027	0.013	0.067
San Lucas	0.023	0.016	0.011	0.054
Santa Catarina	0.013	0.022	0.019	0.024
Tzanpetey	0.015	0.004	0.012	0.029
Río San Francisco	0.076	0.346	N.M.	0.425
Río Quiscab	0.120	0.148	0.184	N.M.
Entrada Planta T.	2.300	2.560	0.034	0.025
Salida Planta T.	0.022	2.620	1.875	2.825

N.M.: No muestreado.

Tabla 2. Nitrógeno de nitritos en muestras del Lago de Atitlán durante cuatro muestreos realizados en 2014 (mg/L).

Sitio de muestreo	mar-14	may-14	ago-14	oct-14
Panajachel	D.L.D.	0.001	D.L.D.	0.001
Quiscab	D.L.D.	0.001	0.036	D.L.D.
Jaibalito	D.L.D.	D.L.D.	D.L.D.	D.L.D.
Centro Lago	D.L.D.	D.L.D.	D.L.D.	D.L.D.
Bahía	D.L.D.	D.L.D.	D.L.D.	D.L.D.
San Pedro	0.001	D.L.D.	D.L.D.	D.L.D.
Santiago	0.001	0.001	D.L.D.	0.002
San Lucas	D.L.D.	D.L.D.	0.001	D.L.D.
Santa Catarina	D.L.D.	D.L.D.	D.L.D.	0.001
Tzanpetey	D.L.D.	D.L.D.	D.L.D.	D.L.D.
Río San Francisco	0.009	0.04	N.M.	0.055
Río Quiscab	0.049	0.004	D.L.D.	N.M.

Entrada Planta T.	0.053	0.043	0.058	0.005
Salida Planta T.	0.013	0.008	0.038	0.015

N.M.: No muestreado. D.L.D.: Debajo del Límite de Detección

Tabla 3. Nitrógeno Total en muestras del Lago de Atilán durante cuatro muestreos realizados en 2014 (mg/L).

Sitios de Muestreo	mar-14	may-14	ago-14	oct-14
Panajachel	N.A.	N.A.	0.073	0.207
Quiscab	0.032	0.025	0.084	0.262
Jaibalito	0.056	0.024	0.073	0.223
Centro Lago	0.053	N.A.	0.081	0.236
Bahía	0.062	0.087	0.066	0.292
San Pedro	N.A.	0.017	0.068	0.257
Santiago	0.043	N.A.	0.072	0.263
San Lucas	0.046	0.037	0.094	0.264
Santa Catarina	0.048	N.A.	N.A.	0.258
Tzanpetey	0.058	0.035	0.126	0.238
Río San Francisco	0.102	N.A.	N.M.	N.A.
Río Quiscab	N.A.	N.A.	N.A.	N.M.
Entrada Planta T.	N.A.	N.A.	N.A.	7.625
Salida Planta T.	N.A.	N.A.	N.A.	10.65

N.M.: No muestreado. N.A.: No analizado.

Tabla 4. Fósforo de ortofosfatos en el Lago de Atilán durante cuatro muestreos realizados en 2014 (mg/L).

Sitio de muestreo	mar-14	may-14	ago-14	oct-14
Panajachel	0.010	0.002	D.L.D.	0.017
Quiscab	0.005	0.001	0.086	0.016
Jaibalito	0.005	0.001	0.001	0.018
Centro Lago	0.003	D.L.D.	0.003	0.017
Bahía	0.006	D.L.D.	0.002	0.018
San Pedro	0.008	D.L.D.	0.01	0.017
Santiago	0.005	0.005	0.003	0.017
San Lucas	0.006	D.L.D.	D.L.D.	0.016
Santa Catarina	0.005	D.L.D.	0.004	0.015
Tzanpetey	0.006	D.L.D.	0.002	0.015
Río San Francisco	0.173	0.233	N.M.	0.075
Río Quiscab	0.085	0.082	0.002	N.M.
Entrada Planta T.	0.990	1.820	0.982	0.670
Salida Planta T.	1.688	1.346	3.360	0.670

N.M.: No muestreado. D.L.D.: Debajo del Límite de Detección

Tabla 5. Fósforo Total en el Lago de Atitlán durante cuatro muestreos realizados en 2014 (mg/L).

Sitios de Muestreo	mar-14	may-14	ago-14	oct-14
Panajachel	0.013	N.A.	0.016	0.016
Quiscab	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Jaibalito	N.A.	N.A.	0.009	N.A.
Centro Lago	0.006	0.003	0.014	0.027
Bahía	0.013	0.009	0.014	N.A.
San Pedro	0.037	N.A.	0.012	N.A.
Santiago	0.022	N.A.	0.015	0.017
San Lucas	N.A.	N.A.	0.014	N.A.
Santa Catarina	0.015	0.049	0.014	N.A.
Tzanpetey	0.02	0.011	0.015	0.014
Río San Francisco	N.A.	1.033	N.M.	0.500
Río Quiscab	0.249	0.227	0.079	N.M.
Entrada Planta T.	3.900	2.294	1.652	4.300
Salida Planta T.	2.240	N.A.	N.A.	2.375

N.M.: No muestreado. N.A.: No analizado.

8.1.3 Otros parámetros fisicoquímicos

Tabla 6. Sólidos disueltos en el Lago de Atitlán en cuatro muestreos realizados en 2014 (mg/L)

Sitio de muestreo	mar-14	may-14	ago-14	oct-14
Panajachel	282	279	264	289
Quiscab	288	259	258	280
Jaibalito	271	277	161	281
Centro Lago	284	278	266	281
Bahía	260	273	256	296
San Pedro	270	268	288	280
Santiago	294	277	287	287
San Lucas	281	271	297	287
Santa Catarina	287	280	279	282
Tzanpetey	293	238	274	289
Río San Francisco	325	174	N.M.	117
Río Quiscab	159	158	161	N.M.

Entrada Planta T.	245	550	416	275
Salida Planta T.	492	349	486	244

N.M.: no muestreado.

Tabla 7. Sólidos en suspensión en el Lago de Atitlán en cuatro muestreos realizados en 2014 (mg/L)

Sitio de muestreo	mar-14	may-14	ago-14	oct-14
Panajachel	3.9	3	1.4	1
Quiscab	3.2	2	2	2
Jaibalito	1.1	0	1.4	3
Centro Lago	3.7	1	1.2	0
Bahía	1.0	1	3.1	1
San Pedro	2.1	2	1.6	2
Santiago	2.5	1	4.9	1
San Lucas	3.1	1	2.4	0
Santa Catarina	3.8	1	2	5
Tzanpetey	3.9	2	3.4	4
Río San Francisco	260	731	N.M.	303
Río Quiscab	38.0	58	77	N.M.
Entrada Planta T.	92.5	78	64.6	67
Salida Planta T.	16.3	3	28.8	27

N.M.: no muestreado.

Tabla 8. Sólidos totales en el Lago de Atitlán en cuatro muestreos realizados en 2014. (mg/L)

Sitios de muestreo	mar-14	may-14	ago-14	oct-14
Panajachel	289	274	N.A.	315
Quiscab	280	268	316	315
Jaibalito	279	285	314	332
Centro Lago	299	254	306	315
Bahía	270	278	264	315
San Pedro	270	283	248	299
Santiago	278	286	265	332
San Lucas	277	278	275	308
Santa Catarina	277	285	272	302
Tzanpetey	277	276	260	307
Río San Francisco	N.A.	1844	N.M.	630
Río Quiscab	202	218	263	N.M.
Entrada Planta T.	746	1168	492	508
Salida Planta T.	526	403	507	971

N.M.: No muestreado. N.A.: No analizado

Tabla 9. Determinación de sulfatos en el Lago de Atitlán durante tres muestreos realizados en 2014 (mg/L)

Sitio de muestreo	mar-14	may-14	ago-14	oct-14
Panajachel	50	21	40	38
Quiscab	42	21	36	26
Jaibalito	07	21	19	25
Centro Lago	43	21	33	32
Bahía	30	20	34	26
San Pedro	30	20	34	28
Santiago	43	21	33	30
San Lucas	44	21	9	31
Santa Catarina	45	20	34	27
Tzanpetey	44	21	33	30
Río San Francisco	19	128	N.M.	26
Río Quiscab	11	11	19	N.M.

N.M.: no muestreado

Tabla 10. Demanda Química de Oxígeno en el Lago de Atitlán durante cuatro muestreos realizados en 2014 (mg-O₂/L)

Sitio de muestreo	mar-14	may-14	ago-14	oct-14
Panajachel	57	82	60	51
Quiscab	52	62	60	81
Jaibalito	35	68	61	59
Centro Lago	60	58	96	56
Bahía	51	61	56	60
San Pedro	51	69	50	54
Santiago	54	65	41	62
San Lucas	56	59	57	50
Santa Catarina	53	68	50	60
Tzanpetey	52	58	51	56
Río San Francisco	68	64	N.M.	73
Río Quiscab	440	79	81	N.M.
Entrada Planta T.	N.M.	232	345	398
Salida Planta T.	N.M.	166	168	147

N.M.: no muestreado.

8.1.4 Radionucleidos en el Lago de Atitlán

Tabla 11. Radionucleidos en muestras de sedimento superficial colectados en el Lago de Atitlán (Bq/g).

Sitio de muestreo	Fecha de colecta	²¹⁰Pb	²²⁶Ra	¹³⁷Cs
Cristalinas, San Juan Sacatepéquez	28/03/2014	0.018	0.026	0.004
Santiago Atitlán	28/08/2014	0.051	0.006	0.002

8.1.5 Metales ecotóxicos en el Lago de Atitlán

Tabla 12. Arsénico en el Lago de Atitlán en cuatro muestreos realizados en 2014 (µg/L)

Sitio de muestreo	mar-14	may-14	ago-14	oct-14
Panajachel	24.929	17.087	15.678	17.548
Quiscab	28.180	17.324	17.264	12.957
Jaibalito	29.679	18.113	6.435	13.387
Centro Lago	22.900	18.556	14.004	14.537
Bahía	29.663	18.976	14.593	16.060
San Pedro	27.816	18.664	15.148	16.541
Santiago	28.504	18.673	13.925	16.451
San Lucas	29.608	19.234	17.445	18.168
Santa Catarina	28.670	19.927	14.433	18.209
Tzanpetey	29.089	19.598	17.445	18.367
Río San Francisco	24.964	17.485	N.M.	9.033
Río Quiscab	12.388	7.729	6.435	N.M.
Entrada Planta T.	53.062	33.273	23.046	36.839
Salida Planta T.	107.890	37.061	41.091	17.088

N.M.: no muestreado.

Tabla 13. Mercurio en el Lago de Atitlán en cuatro muestreos realizados en 2014 ($\mu\text{g/L}$)

Sitio de muestreo	mar-14	may-14	ago-14	oct-14
Panajachel	D.L.D.	0.024	3.806	4.285
Quiscab	D.L.D.	D.L.D.	3.295	2.522
Jaibalito	1.117	D.L.D.	3.078	2.413
Centro Lago	0.334	D.L.D.	2.632	3.219
Bahía	1.145	D.L.D.	2.747	0.442
San Pedro	0.878	8.253	2.907	0.723
Santiago	D.L.D.	0.458	2.915	0.633
San Lucas	0.389	0.467	2.726	0.130
Santa Catarina	D.L.D.	0.923	2.781	0.462
Tzanpetey	0.603	D.L.D.	2.990	0.237
Río San Francisco	2.438	D.L.D.	N.M.	0.460
Río Quiscab	1.891	2.399	3.484	N.M.
Entrada Planta T.	1.242	0.011	2.887	0.097
Salida Planta T.	0.562	D.L.D.	2.834	0.301

N.M.: No muestreado. D.L.D.: Debajo del Límite de Detección

8.1.7 Contaminantes emergentes

No se detectaron fármacos en muestras de agua del Lago de Atitlán y ríos, sin embargo en la planta de tratamiento Los Cebollales, se detectaron desketoprofeno, ibuprofen y diclofenaco, utilizando un muestreador pasivo (ver anexos, los cromatogramas correspondientes).

8.1.8 Fitoplancton

Tabla 14. Fitoplancton frente al río Quiscab durante marzo 2014.

Phyllum	Género	Unidades por litro
Bacillariophyta	<i>Fragilaria</i>	9
Bacillariophyta	<i>Aulacoseira</i>	31
Dinophyta	<i>Ceratium</i>	11
Chlorophyta	<i>Closteriopsis</i>	10
Chlorophyta	<i>Pediastrum</i>	8
Chlorophyta	<i>Staurastrum</i>	1

Chlorophyta	<i>Botryococcus</i>	1
Cyanophyta	<i>Microcystis</i>	1

Tabla 15. Fitoplancton en el centro del lago Atitlán durante marzo 2014.

Phyllum	Género	Unidades por litro
Bacillariophyta	<i>Fragilaria</i>	1
Bacillariophyta	<i>Aulacoseira</i>	23
Bacillariophyta	<i>Mougeotia</i>	1
Dinophyta	<i>Ceratium</i>	2
Chlorophyta	<i>Closteriopsis</i>	13
Chlorophyta	<i>Botryococcus</i>	4
Cyanophyta	<i>Limnoraphis</i>	1

Tabla 16. Fitoplancton en Santa Catarina Palopó durante marzo 2014.

Phyllum	Género	Unidades por litro
Bacillariophyta	<i>Fragilaria</i>	7
Bacillariophyta	<i>Aulacoseira</i>	31
Bacillariophyta	<i>Mougeotia</i>	2
Dinophyta	<i>Ceratium</i>	1
Chlorophyta	<i>Closteriopsis</i>	20
Chlorophyta	<i>Botryococcus</i>	1

Tabla 17. Fitoplancton en Tzantpetey durante marzo 2014.

Phyllum	Género	Unidades por litro
Bacillariophyta	<i>Fragilaria</i>	3
Bacillariophyta	<i>Aulacoseira</i>	46
Bacillariophyta	<i>Mougeotia</i>	1
Dinophyta	<i>Ceratium</i>	1
Chlorophyta	<i>Closteriopsis</i>	2
Chlorophyta	<i>Pediastrum</i>	2
Chlorophyta	<i>Botryococcus</i>	3
Cyanophyta	<i>Microcystis</i>	2
Cyanophyta	<i>Limnoraphis</i>	1

8.2 Matriz de Resultados

Esta matriz presenta los resultados esperados (resultados al inicio del proyecto) y los resultados concretos u obtenidos en la investigación, por medio de la siguiente matriz:

Objetivo Específico	Resultado esperado	Resultado obtenido
Objetivo específico 1: Determinar los niveles de nutrientes (especies inorgánicas de nitrógeno y fósforo) y la calidad fisicoquímica del agua del Lago de Atitlan y sus afluentes.	Conocimiento sobre los niveles actuales de nutrientes y estado trófico del Lago de Atitlán y la efectividad de las medidas adoptadas para la disminución de la contaminación en el lago.	Concentraciones de nutrientes y niveles de parámetros fisicoquímicos en el Lago de Atitlán.
Objetivo específico 2: Determinar los niveles de contaminantes emergentes (seis fármacos) en agua y sedimentos del lago de Atitlán y sus principales afluentes.	Base de datos de niveles de contaminantes emergentes (acetaminofeno, cafeína, desketoprofeno, diclofenaco sódico, fenilefrina e ibuprofeno) en agua y sedimentos del Lago de Atitlán.	Número de muestras colectadas. Método propuesto redactado.
Objetivo específico 3: Determinar los niveles de radionucleidos emisores gamma, naturales y artificiales (^{137}Cs , ^{210}Pb , ^{226}Ra) en sedimentos del Lago de Atitlán.	Base de datos de radionucleidos ^{137}Cs , ^{210}Pb , ^{226}Ra en agua y sedimentos del Lago de Atitlán.	Número de muestras colectadas y preservadas. Procedimiento de operación de espectrómetro gamma redactado.
Objetivo específico 4: Determinar los niveles de metales ecotóxicos: plomo y mercurio, en agua del lago de Atitlán.	Base de datos de niveles de metales ecotóxicos en el Lago de Atitlán.	Concentraciones de As en muestras de agua.
Objetivo específico 5: Determinar la abundancia de fitoplancton y sus variaciones estacionales en el lago de Atitlán.	Base de datos de principales organismos de fitoplancton en el Lago de Atitlán durante los muestreos.	Número de muestras de fitoplancton colectadas.

9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

9.1 Calidad Fisicoquímica del agua en el Lago de Atitlán:

9.1.1 Parámetros de campo

Las Figuras 1 a 3 presentan los resultados de los perfiles de pH hasta una profundidad de 30 m en tres muestreos efectuados en 2014. En general, el pH del Lago de Atitlán es ligeramente alcalino, con una ligera tendencia a la disminución con la profundidad, con algunas excepciones como el caso de Jaibalito en marzo, en que se observó un ligero incremento con la profundidad en la parte más superficial del perfil. El pH es un parámetro importante para la calidad del agua ya que afecta las formas químicas y los impactos ambientales de las sustancias químicas en el agua, entre ellas, los metales, los cuales pueden disolverse como iones a bajos valores de pH y precipitar como hidróxidos y óxidos a valores de pH más altos, para luego redisolverse de nuevo a valores de pH muy elevados. A valores altos de pH, el equilibrio amonio-amoniaco, se desplaza a la forma amoniaco, tóxica para los peces. El pH ligeramente básico encontrado en el Lago de Atitlán favorece la precipitación de fosfatos, lo cual favorecería también la precipitación de metales.

Las Figuras 4 a 6 presentan los resultados de los perfiles de temperatura hasta una profundidad de 30 m, habiéndose observado las mayores temperaturas en agosto. Existe una tendencia de disminución de la temperatura con la profundidad, la cual se observó en todos los sitios de muestreo, durante los tres muestreos realizados a la fecha. La importancia de la temperatura para la vida acuática se debe a que regula la solubilidad de los gases como el oxígeno y el dióxido de carbono, cuyas concentraciones disminuyen conforme la temperatura se incrementa. El metabolismo de peces y plantas también depende de la temperatura del agua, así como el equilibrio de especies químicas importantes, como el amoniaco, el cianuro de hidrógeno y el sulfuro de hidrógeno. En el presente estudio se observaron las mayores temperaturas en agosto, cuando hasta los 20 m, la temperatura era superior a 23.0°C.

Las Figuras 7 a 9, presentan los resultados de perfiles de oxígeno disuelto en el Lago de Atitlán en mg/L mientras que las Figuras 10 a 12, presentan los perfiles de saturación de oxígeno disuelto hasta 30 m de profundidad. En todos los sitios

se observó la tendencia que era de esperar, de disminución de la concentración y saturación de oxígeno, con la profundidad. El oxígeno disuelto es necesario para la vida de los peces y otras formas de vida acuática. El oxígeno se disuelve en la superficie del agua a partir de difusión desde la atmósfera, principalmente, y a partir de la fotosíntesis de las plantas acuáticas. Concentraciones entre 5.0 y 8.0 mg/L son aptos para la vida acuática, siendo necesarias concentraciones entre 5-6 mg/L para la reproducción y crecimiento de la mayoría de los peces. A concentraciones de 3-4 mg/L los peces dejan de alimentarse y mueren a concentraciones menores a 1 mg/L. Valores de oxígeno disuelto entre 4.5 y 6 mg/L son indicios de contaminación moderada, 4.0 y 4.5 mg/L de agua moderadamente contaminada, de 4.0-4.5 mg/L agua altamente contaminada y concentraciones menores a 4.0 mg/L corresponden a agua severamente contaminadas (Weiner, 2008). En el presente estudio, en todos los sitios las concentraciones de oxígeno disuelto fueron superiores a 4 mg/L hasta los 30 m, observándose una disminución brusca a partir de 18-20 m.

9.1.2 Niveles de nutrientes en el Lago de Atitlán

Según los resultados de nutrientes obtenidos en marzo de 2014 (primera tabla), las concentraciones de fosfatos y nitratos, con excepción del Río Quiscab y la planta de tratamiento Los Cebollales, que descarga sus aguas en el Lago, corresponden a cuerpos de agua oligotróficos. En el caso de la planta de tratamiento, algunos parámetros han sido más elevados en la salida que en la entrada (Tablas 2 y 3). Se espera la información de caudales que fue solicitada a ASMCLAE, para ampliar la interpretación de resultados.

Los nutrientes en ecosistemas acuáticos están constituidos principalmente por compuestos de nitrógeno, fósforo y carbono, siendo su función proporcionar energía y soporte estructural a los seres vivos. Los compuestos de fósforo y nitrógeno presentan gran importancia, ya que la productividad depende de sus concentraciones. El Lago de Atitlán ha presentado en varios estudios, desde la década pasada, niveles de nutrientes que lo categorizarían como un lago eutrófico. Los niveles de contaminación del Lago de Atitlán se han incrementado principalmente, debido al crecimiento de la población, la descarga de aguas residuales, la deforestación y el uso no controlado de fertilizantes que han provocado el aumento de los niveles de nutrientes.

En esta sección se discuten los niveles de nutrientes de fósforo y nitrógeno encontrados en el Lago de Atitlán durante los cuatro muestreos realizados en 2014.

9.1.3 Nitrógeno de nitratos y nitritos

El amonio y otros compuestos de nitrógeno tienden a oxidarse a nitritos y nitratos en aguas naturales, por mediación de las bacterias aeróbicas, formándose así

formas asequibles para el ingreso del nitrógeno a la cadena trófica por la fijación de plantas y fitoplancton. En aguas con niveles altos de oxígeno, el nitrito se oxida rápidamente a nitrato. Al no adsorberse en el material particulado, estas formas de nitrógeno son muy móviles en el ambiente acuático. Se considera que las concentraciones de nitratos o nitritos superiores a 10 mg/L en el agua de consumo humano, son peligrosas para la salud humana. Valores típicos para los límites máximos de nitratos son de 100 mg/L de nitrógeno de nitratos y 10 mg/L de nitrógeno de nitritos para aguas para uso agrícola, mientras que para consumo humano son de 10 mg/L de nitrógeno de nitratos y 1.0 mg/L de nitrógeno de nitritos. Los niveles de nitratos son importantes en el agua para consumo humano ya que los nitratos pueden reducirse a nitritos en la saliva y en el tracto intestinal de niños menores de seis meses, produciendo metahemoglobina al oxidar el hierro de la hemoglobina en la sangre. En el agua superficial del Lago de Atitlán se encontraron niveles de oxígeno disuelto elevados, por lo que es normal que se encuentren niveles bajos de nitritos.

En la Tabla 1 se presenta los resultados de nitrógeno de nitratos encontrados en el Lago de Atitlán durante los cuatro muestreos efectuados en 2014. Los niveles de nitratos encontrados en el lago pueden con un mínimo de 0.004 mg/L en Tzanpetey en mayo, y un máximo de nitrógeno de nitratos en marzo, julio y agosto, respectivamente. Por otra parte, en el estudio se colectaron muestras en la entrada y salida de la Planta de tratamiento de aguas residuales Los Cebollales, en Panajachel, en cuyas muestras se encontraron niveles más elevados de nitratos, observándose un mínimo de 0.022 mg/L en la salida de la planta en marzo y un máximo en la salida de la planta en octubre. En 2014 se encontraron niveles de nitratos inferiores a los encontrados por Oliva y colaboradores en 2009 (Oliva et al., 2010), lo cual podría deberse a medidas adoptadas para reducir la contaminación desde la floración más importante de cianobacterias ocurrida en octubre de 2009.

En la Tabla 2 se presenta los resultados de nitrógeno de nitritos, en los cuales puede apreciarse que en ningún caso se superaron los límites de nitritos para agua potable, en las muestras colectadas en el lago, estando en la mayoría de ocasiones por debajo del límite de detección de 0.0004 mg/L. Sin embargo, en los ríos Quiscab y San Francisco, y en la planta Los Cebollales se encontraron niveles mayores de nitritos, con un máximo de 0.058 mg/L de nitrógeno de nitritos en la entrada de la planta en agosto. Estos niveles en los ríos y la planta, indican que una de las principales fuentes de contaminación del lago se da por descargas de aguas residuales.

9.1.3.1 Nitrógeno total

El nitrógeno total corresponde a la sumatoria del nitrógeno de especies inorgánicas y orgánicas presentes en el agua, por lo que proporciona información sobre la carga total de nitrógeno disponible en un cuerpo de agua. El nitrógeno total es un parámetro importante para el establecimiento de límites para descargas de aguas residuales, además de proporcionar información sobre el nutriente

limitante en un lago. En 2009 se encontró que el nitrógeno era el nutriente limitantes en octubre, durante el período de la floración de cianobacterias más extenso observado en la última década en el lago.

En la Tabla 3 se presenta los resultados de nitrógeno total en los diferentes sitios de muestreo, durante los muestreos realizados en 2014. En la mayoría de los sitios se observaron niveles de nitrógeno total menores a 0.5 mg/L durante los cuatro muestreos, lo cual indica que no hay una contaminación muy elevada por nitrógeno en el lago. Los mayores niveles de nitrógeno total en el lago de Atitlán se observaron en octubre, cuando en todas las muestras analizadas se observaron concentraciones superiores a 0.2 mg/L siendo el sitio en la Bahía de San Juan la Laguna y San Pablo la Laguna el que presentó la mayor concentración con 0.292 mg/L.

9.1.3.2 Fósforo de ortofosfato y Fósforo total

Debido a la baja solubilidad de sus compuestos, el fósforo es por lo general el nutriente limitante en aguas naturales. La concentración de fósforo disuelto es frecuentemente lo suficiente baja para limitar el crecimiento de algas en lagos con características del Lago de Atitlán. El fósforo es un elemento esencial para el metabolismo, encontrándose presente siempre en los desechos animales y en las aguas residuales. Las concentraciones elevadas de fósforo en las descargas de aguas residuales son con frecuencia una de las principales causas del florecimiento de algas y otros precursores de procesos de eutrofización (Weiner, 2007). Los sedimentos sirven como reservorio para el fósforo precipitado y adsorbido, el cual puede redisolverse e incrementar los niveles en el agua, con los niveles de pH bajos y variaciones de la temperatura. Se considera que los niveles naturales de fósforo total disuelto son de alrededor de 0.025 mg/L de fósforo, mientras que para los fosfatos se considera que los niveles naturales son de 0.01 mg/L.

La Tabla 4 se presenta los niveles de fósforo de fosfatos en el Lago de Atitlán durante los cuatro muestreos realizados en 2014. En vista que los niveles de fósforo de fosfatos para que puedan ocurrir florecimientos algales, pueden ser tan bajos como 0.01-0.005 mg/L, y por lo general de alrededor de 0.05 mg/L, puede observarse que los niveles de fósforo de fosfatos encontrados en todos los sitios, especialmente en el mes de octubre (0.015-0.018 mg/L) en todos los sitios en el lago) pueden provocar florecimientos algales. Tanto en los ríos como en la planta de tratamiento se encontraron niveles de fósforo de fosfatos sumamente elevados, comparados con los encontrados en el lago, lo que indica que las aguas residuales son una importante fuente de contaminación. En los ríos, la concentración más elevada se encontró en el Río San Francisco en mayo de 2014 con 0.233 mg/L de fósforo de fosfatos. En la planta de tratamiento, el mayor nivel de fósforo de fosfatos se encontró en agosto con 3.36 mg/L en la salida de la planta, por lo que la planta también es una fuente de contaminación de este nutriente.

La Tabla 5 presenta los resultados de fósforo total en el Lago de Atitlán durante los muestreos efectuados en 2014. Las concentraciones de fósforo total en el lago no son tan elevadas como las encontradas en 2009, habiéndose encontrado el máximo en el Centro del Lago con 0.027 mg/L en octubre. En los ríos y la planta de tratamiento las concentraciones encontradas sí fueron elevadas, correspondiente al máximo en ríos, al río San Francisco en mayo con 1.033 mg/L y al máximo en la planta de tratamiento en octubre, cuando se encontraron 4.3 mg/L en la entrada y 2.375 mg/L en la salida de la planta, confirmando que los ríos y las descargas de aguas residuales son una fuente de contaminación por nutrientes en el lago de Atitlán.

9.1.4 Sólidos

Los resultados de los sólidos disueltos, sólidos en suspensión y sólidos totales en el lago de Atitlán durante los cuatro muestreos se presentan en las Tablas 6, 7 y 8, respectivamente. El término sólidos se refiere en general a la materia que se encuentra suspendida (sólidos insolubles) o disueltos (sólidos disueltos) en el agua. Los sólidos pueden afectar la vida acuática de diferentes formas, por ejemplo, los sólidos suspendidos pueden causar abrasión, o pueden aglomerarse en las branquias de los peces, pueden dañar el desove y reducir la fotosíntesis al bloquear la penetración de la luz solar. Las aguas duras, principalmente debido a las concentraciones de calcio y magnesio disueltos, reducen la toxicidad de los metales a la vida acuática.

La presencia de sólidos disueltos con algunos metales como hierro, cobre, manganeso y zinc pueden darle un sabor desagradable al agua. En la Tabla 6 y figura 20 se presentan los resultados de sólidos disueltos, los cuales fueron ligeramente superiores a los observados en 2009. Se observó un máximo de sólidos disueltos en el lago en Tzanpetey en marzo con 293 mg/L y un mínimo de 161 mg/L en Jaibalito en agosto. En los ríos se observó un máximo de 325 mg/L en San Francisco en marzo y un mínimo de 117 en el mismo río en octubre. En la Planta de Tratamiento Los Cebollales, el máximo para la entrada de la planta de tratamiento Los Cebollales se observó en mayo con 550 mg/L mientras que el máximo para la salida de la planta se observó en marzo, con 492 mg/L, valores que como era de esperarse, son superiores a los niveles en el lago y confirman que las aguas residuales continúan siendo una fuente de contaminación importante para el Lago de Atitlán.

La Tabla 7 se presenta los resultados de los sólidos suspendidos en el Lago de Atitlán, los cuales son inferiores a los encontrados en 2009, en los sitios correspondientes al lago de Atitlán, habiéndose observado un máximo de 4.9 mg/L en agosto en Santiago Atitlán. En los ríos, los niveles de sólidos en suspensión fueron mucho mayores, al encontrarse entre 260 mg/L en marzo y 730 mg/L en mayo, en el Río San Francisco. En la entrada de la Planta de Tratamiento, se observó un mínimo de 64.6 mg/L en agosto y un máximo de 92.5 en marzo, mientras que en la salida el mínimo se observó en mayo, con 3 mg/L y el máximo en agosto con 28.8 mg/L.

En la Tabla 8 se presenta los resultados de los sólidos totales en el Lago de Atitlán. Los sólidos totales incluyen los sólidos que pueden separarse por filtración (sólidos suspendidos totales y sólidos disueltos totales), por lo que dan información de la totalidad de materia presente en el agua. En presente estudio, los mayores valores se observaron en octubre, cuando en casi la totalidad de los sitios de muestreo en el lago, se encontraron niveles superiores a 300 mg/L, con un máximo de 332 mg/L en Jaibalito y Santiago Atitlán. En los ríos, el Río San Francisco presentó el valor máximo en mayo con 1844 mg/L, mientras que en la entrada de la planta de tratamiento el mayor valor se observó en mayo con 1168 mg/L y en la salida de la planta se observó el mayor valor en octubre con 971 mg/L.

9.1.5 Sulfatos

En la Tabla 9 se presenta los resultados de sulfatos en el Lago de Atitlán durante los cuatro muestreos efectuados en 2014. El sulfato es la forma oxidada del azufre. Casi todas las aguas naturales contienen sulfato, que se encuentra comúnmente como un componente importante de las aguas no contaminadas y está incluido entre los seis mayores iones de las aguas superficiales, junto con Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Cl^- , HCO_3^{-2} . Los sulfatos son una fuente de oxígeno para las bacterias y bajo condiciones anaeróbicas, las bacterias reductoras de sulfatos lo reducen a H_2S , el cual es precipitado como sales insolubles, o incorporado en organismos vivos. Este compuesto provoca olores fétidos en aguas que reciben altos contenidos de sulfatos, especialmente provenientes de aguas residuales o en humedales.

En el presente estudio no se encontraron niveles elevados de sulfatos en el lago en relación con estudios anteriores, encontrándose el valor máximo en Panajachel en marzo, con 50 mg/L. En los ríos, la mayor concentración se encontró en el río San Francisco con 128 mg/L en mayo. Niveles de 250 mg/L se consideran como la concentración mínima palatable para sulfatos, que se consideran una sustancia no tóxica para la vida acuática, por lo que el lago de Atitlán se encuentra con niveles normales de sulfatos.

9.1.6 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Los niveles de DQO encontrados en los sitios de muestreo en el Lago de Atitlán (Tabla 10), presentaron un máximo de 96 mg/L en el centro del lago en agosto y un mínimo de 35 mg/L en marzo, los cuales pueden considerarse como normales para el lago. En la planta de tratamiento los niveles fueron muy superiores, con un máximo de 298 para la entrada observado en octubre y de 168 mg/L en agosto, en la salida de la planta. En los ríos, el río Quiscab presentó la mayor concentración en marzo con 440 mg/L.

9.1.7 Niveles de arsénico y mercurio en el Lago de Atitlán

En las Tablas 12 se presenta los resultados de arsénico y mercurio, respectivamente, de muestras de agua colectadas en el Lago de Atitlán durante los cuatro muestreos. El arsénico (As) se investigó ya que al iniciarse el proyecto se informó por parte de AMSCLAE que en un estudio de Geólogos del Mundo se había reportado recientemente la presencia de As en agua subterránea de la cuenca. En todas las muestras se han encontrado niveles detectables de As, encontrándose también en la planta de tratamiento, concentraciones más altas de As en la salida que en la entrada, habiéndose encontrado arriba de 100 $\mu\text{g/L}$ en marzo en la salida de la planta y niveles arriba de 20 $\mu\text{g/L}$ en todos los sitios de muestreo en el lago, en el mismo mes, lo cual supera el límite máximo permitido para agua potable, según la norma para el agua potable de COGUANOR (2000). El As es un elemento tóxico que puede causar problemas en la salud de la población, por lo que debe profundizarse en su estudio. Se encontró también la presencia de mercurio (Hg) en casi todos los sitios de muestreo en concentraciones de hasta 3.81 $\mu\text{g/L}$, niveles que no son tan elevados como los de As. Los resultados de presencia de As en el agua superficial del Lago de Atitlán y sus afluentes, son el hallazgo más importante en el proyecto, ya que no se contaba con información sobre niveles de As en el lago, además de que existe una propuesta del proyecto “Todos por el Lago”, planteada en el Simposio de Investigaciones Científicas y Tecnológicas en la cuenca del Lago de Atitlán, realizado en Panajachel en septiembre de 2014, de “exportar” las aguas residuales de la cuenca hacia la costa sur, para disminuir la descarga de nutrientes hacia el lago y lo que según los proponentes, trasladaría aguas fértiles a los cultivos de la costa sur. Sin embargo, de realizarse esta “exportación” de aguas residuales, se estarían contaminando los suelos y cultivos de la zona sur con metales.

9.2 Niveles de radiactividad en sedimentos del Lago de Atitlán

En la Tabla 11 se presentan los resultados de concentración de actividad de tres radionucleidos cuantificados en muestras de sedimentos superficiales colectados en dos sitios en el Lago de Atitlán. Uno en Cristalinas, en San Juan la Laguna y el otro frente a Santiago Atitlán. En ambos sitios se detectaron los radionucleidos naturales plomo-210 y radio-226 y el radionucleido artificial cesio-137. En la muestra de San Juan la Laguna se detectaron menores concentraciones, posiblemente debido a que el sitio de muestreo se encuentra en una pendiente pronunciada, por lo que una parte de los sedimentos se desplaza a mayores profundidades con el tiempo, siendo menor la acumulación de sedimentos, por esta razón, no se tiene una diferencia entre la concentración de plomo-210 (0.018 Bq/g) y radio-226 (0.026 Bq/g), que permita establecer en dicho sitio una estación para fechamiento de núcleos de sedimentos.

La mayor concentración de cesio-137 (0.004 Bq/g) en relación con la concentración encontrada en Santiago Atitlán (0.002 Bq/g), indicaría también una mayor degradación de la cuenca en Cristalinas que en Santiago Atitlán. Por otra parte, la mayor diferencia entre las concentraciones de actividad de plomo-210 (0.051 Bq/g) y radio-226 (0.006 Bq/g), en Santiago Atitlán, indica que hay una mayor cantidad de plomo-210 en exceso en Santiago, lo que permitiría realizar un fechamiento de núcleos de sedimentos en dicho lugar, con vistas a interpretar los cambios ambientales ocurridos en el Lago de Atitlán en el último siglo. Los resultados de cesio-137 por otra parte, constituyen la línea base de este radionucleido, para el monitoreo de la radiactividad en el futuro, especialmente si ocurren eventos de liberación de radiactividad a escala global, como los ocurridos en Chernobyl en 1986 y en Fukushima en 2010.

9.3 Niveles de contaminantes emergentes en el Lago de Atitlán

Se detectaron tres fármacos, desketoprofeno, ibuprofeno y diclofenaco, en agua de la salida de la Planta de Tratamiento “Los Cebollales”, ubicada en Panajachel, utilizando muestreadores pasivos, los cuales son colocados por períodos mínimos de 25 días, para poder concentrar contaminantes en bajas concentraciones. Debido a que no se cuenta con información del caudal, no es posible realizar la cuantificación de los fármacos detectados. Por otra parte, no se detectaron fármacos en muestras de agua del Lago de Atitlán ni en los tributarios, debido a que las concentraciones son muy bajas para poder ser detectados por la metodología empleada, en la cual se analizan muestras de 1 L por HPLC con detector de arreglo de diodos. Es importante evaluar otra metodología para el análisis cuantitativo de los fármacos encontrados, en vista de las consecuencias que pueden presentar para la vida acuática.

9.4 Fitoplancton en el Lago de Atitlán

Se hizo conteo de fitoplancton con las muestras colectadas en marzo de 2014 (primer muestreo). En cuatro puntos muestreados, incluyendo el centro del lago, se encontraron un total de 11 géneros, seis de los cuales se encontraron distribuidos en los cuatro puntos y los restantes distribuidos en tres de los cuatro puntos, tablas 14 a 17. Se han reportado al menos 40 géneros en el lago (Rejmánková, *et al.*, 2011), denotando la falta de un muestreo más intenso espacio-temporalmente.

De los géneros encontrados *Aulacoseira*, una diatomea colonial filamentosa, fue el más abundante en los 4 puntos de muestreo, seguido de *Closteriopsis* en 2 de los puntos de muestreo, tablas 14 a 17 y figuras 13 a 16. Cianobacterias como

Limnorphis solo aparece presente en dos puntos de muestreo, sin embargo este género se ha vuelto tan dominante en ciertas épocas hasta el punto de causar florecimientos que han cubierto buena parte del lago (Rejmánková, *et al.*, 2011).

10. ACTIVIDADES DE GESTIÓN, VINCULACIÓN Y DIVULGACIÓN

En esta sección debe colocar las actividades realizadas durante el proceso de investigación en:

- Docencia
- Divulgación
- Gestión y vinculación

1. Firma de carta de entendimiento entre AMSCLAE y Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, para dar continuidad a la investigación de la contaminación y procesos biogeoquímicos en el Lago de Atitlán, como base para la toma de decisiones. Dentro del marco de la carta de entendimiento y del proyecto, se ha recibido apoyo para el traslado del personal en lancha de AMSCLAE y trámite de autorizaciones para ingreso a la Planta de Tratamiento Los Cebollales ubicada en Panajachel.

2. El proyecto y futuras investigaciones relacionadas, está siendo discutido en Taller en el Taller del Organismo Internacional de Energía Atómica “Training Workshop on Implementation of physiological biomarkers on aquatic organisms like chronic environmental” del 22 al 26 de septiembre de 2014. En dicho taller se recibió capacitación para iniciar estudios de biomarcadores en peces, luego de la evidencia de los niveles altos naturales de arsénico en el Lago de Atitlán.

3. Presentación de resultados en Taller de CYTED:

Los resultados parciales del proyecto se presentarán en un Taller de la Red CYTED 411RT0430- Desarrollo de Metodologías, Indicadores Ambientales y Programas para la Evaluación Ambiental Integral y la Restauración de Ecosistemas Degradados “que se realizará en Ciudad de Panamá del 8 al 10 de octubre del presente año.

4. Se proporcionó a AMSCLAE un informe de resultados de niveles de nutrientes en planta de tratamiento, como parte de la cooperación interinstitucional relacionada con el proyecto.

5. Capacitación de estudiante de EPS de Ingeniería Química

11. CONCLUSIONES

Existe presencia de fármacos (desketoprofeno, ibuprofen y diclofenaco), en las aguas residuales descargadas dal Lago de Atitlán, en concentraciones por debajo del límite de cuantificación, que podrían tener consecuencias negativas para la

vida acuática del lago, que podrían ser manifestadas en alteraciones en el comportamiento de peces y otros organismos acuáticos.

Los radionucleidos ^{137}Cs , ^{210}Pb y ^{226}Ra se encuentran en sedimentos del Lago de Atitlán en concentraciones que no representan riesgo para la salud humana y la ecología del lago, presentando utilidad para la evaluación de los cambios ambientales en la cuenca y como línea base para el monitoreo.

El arsénico y el mercurio se encuentran en concentraciones cuantificables en el Lago de Atitlán, encontrándose el arsénico en concentraciones superiores a límites recomendados para agua potable, lo cual limita las posibilidades de aplicación de propuestas de exportación de aguas residuales hacia afuera de la cuenca del lago.

Los niveles de nutrientes en ríos y planta de tratamiento, indican que las aguas residuales representan una fuente de contaminación importante en la cuenca del Lago de Atitlán.

Las concentraciones de contaminantes radiactivos en peces son menores a los límites de detección, por lo que no representan riesgo para la salud de los consumidores.

12. RECOMENDACIONES

Es importante realizar estudios de biomarcadores en organismos acuáticos para evaluar el riesgo el impacto de la contaminación por metales en el Lago de Atitlán.

Se recomienda no considerar la propuesta de solución de exportación de aguas residuales hacia afuera de la cuenca del Lago de Atitlán, ya que se estarían contaminando otros ecosistemas con arsénico.

Es recomendable determinar los niveles de fármacos en el Lago de Atitlán, utilizando metodología con límites de detección mejorados, lo cual puede lograrse por medio de mejoras en la metodología analítica, o por medio de técnicas analíticas con mejores límites de detección que la cromatografía de líquidos de alta resolución con detector de arreglo de diodos.

13. BIBLIOGRAFÍA

APHA, AWWAA, WEF. (2006) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20 ed. APHA, Washington, DC. 1193pp.

Barceló, D., López, J., Petrovic, M., Lacorte, S., Piña, B., Hernando, M. (2009). Fármacos, drogas de abuso y retardantes de llama, suponen un riesgo potencial para el agua potable. Agencia Catalana del Agua. Valencia, España, pp. 37.

Bolsunovsky, A., Dementyev, D. (2011) Evidence of the radioactive fallout in the center of Asia (Rússia) following the Fukushima Nuclear Accident. Journal of Environmental Radioactivity. 102: 1062-1064.

Buesseler, K., Aoyama, M. (2011) Impacts of the Fukushima Nuclear Power Plants on Marine Radioactivity. Environmental Science and Technology. 45:9931-9935.

COGUANOR (2000) Norma Guatemalteca Obligatoria para el Agua Potable NGO 29.001.98.

Guillén, J. Pérez, J.F. (1996) "Evaluación de Radiactividad Ambiental en Guatemala". Ing. Cienc. Quim. Vol. 16, No. 1, P. 24-27.

Gutiérrez, E.A. (1998) Determinación de ^{238}Pu y $^{239+240}\text{Pu}$ en suelos de diferentes regiones agrícolas de Guatemala. Tesis Licenciatura en Química. USAC. 66 p.

Last, W.M., Smol, J.P. (2001) Tracking Environmental Change Using Lake Sediments: Vol. 2: Physical and Geochemical Methods. Dordrecht: Kluwer. 604 p.

Lleonart, M. (2009). Contaminantes y Patógenos Emergentes. Nuevas Necesidades de Control. Sociedad de Aguas de Barcelona, S.A. España, pp. 14.

Muñoz, I., Gómez, J., Molina, A., Huijbregts, M., Fernández, A., García-Calvo, E. (2008). Ranking potential impacts of priority and emerging pollutants in urban wastewater through life cycle impact assessment. Chemosphere, 74 (1) 37-44.

Oliva, B., Pérez, J.F., Del Cid, B., Martínez F.J., Valladares, B. (2010) Estudio de contaminantes ecotóxicos en agua y organismos acuáticos del Lago de Atitlán. Informe Final Proyecto DIGI. 45 pp.

Oliva, B., Pérez, J.F., Valladares, B. (2011) Evaluación de la Eutrofización en los Lagos Atitlán y Petén Itzá de Guatemala. En XIII Congresso Brasileiro de Limnologia. Natal, septiembre de 2011.

OMS. (1989) Guías para la Calidad del Agua Potable. OMS, Washington. 132pp.

Pérez, J.F., Oliva, B.E., Aguilar, E. (1998) "Radioactive Contamination of the Guatemalan Marine Environment". Proceedings International Symposium on Marine Pollution, Monaco 5-9 october 1998. P. 600-601. IAEA, Monaco.

Perez, J.F., Ayala, R.E. (1996) *Consequences in Guatemala of the Chernobyl Accident*. IAEA TECDOC-964. One decade after Chernobyl: Summing up the consequences of the accident Vol. 2. P. 150-152. Vienna, Austria April.

Pérez, J.F. (1993) *Actividad Beta en Suelos y Plantas de diferentes regiones Agrícolas de Guatemala*. Tesis de graduación de Licenciatura en Química. 57 p.

Rejmánková, E., Komárek, J., Dix, M., Komárková, J. y Girón, N. (2011) *Cyanobacterial blooms in Lake Atitlán, Guatemala*. *Limnologica* 41 (2011) 296-302.

Unión Europea (2000). *Directiva 2000/60/CE de 23 de octubre de 2000*. Publicación Oficial, C513, 23.10.2000.

USDE (1997) *Plutonium*. HASL-300, 28th Ed.

Weiner, E. R. (2008). *Applications of Environmental Aquatic Chemistry. A Practical Guide*. CRC Press, Taylor & Francis Group. USA. 436 pp.

ANEXOS

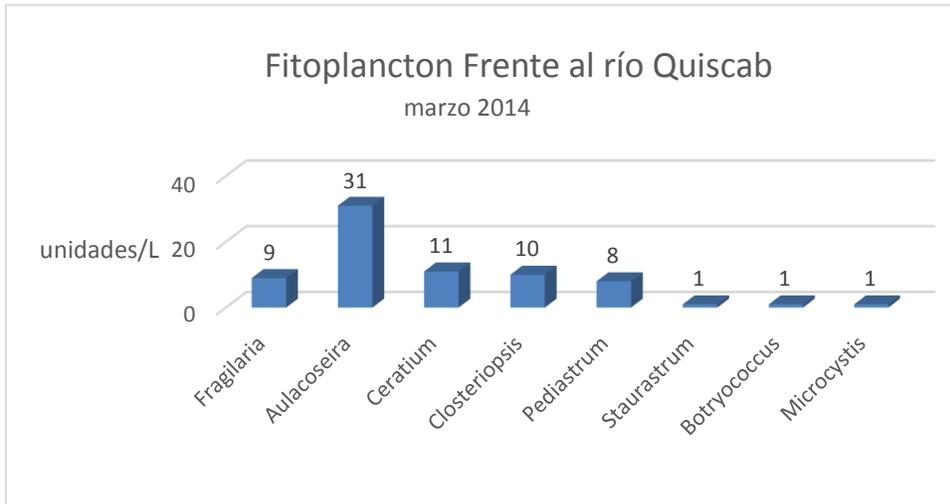


Figura 13. Fitoplancton frente al río Quiscab durante marzo 2014.

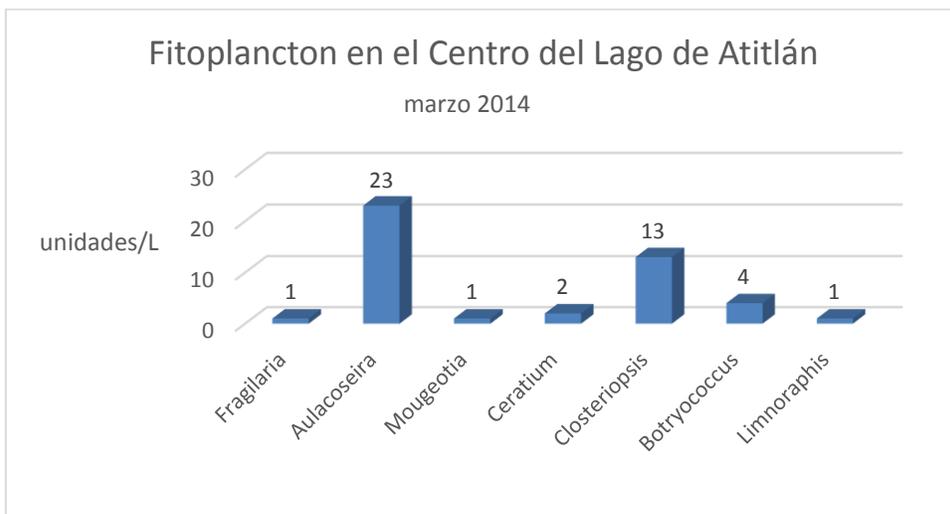


Figura 14. Fitoplancton en el centro del Lago Atitlán durante marzo 2014

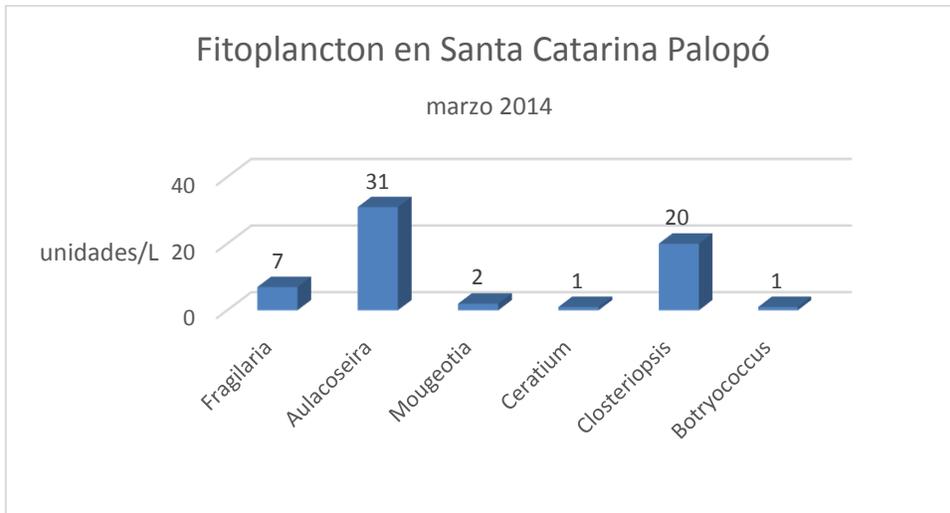


Figura 15. Fitoplancton en Santa Catarina Palopó durante marzo 2014

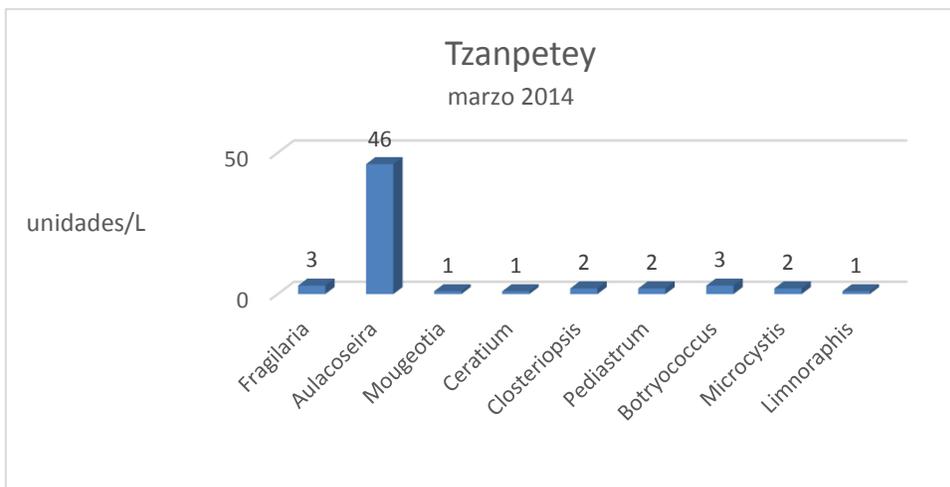


Figura 16. Fitoplancton en Tzanpetey durante marzo de 2014.

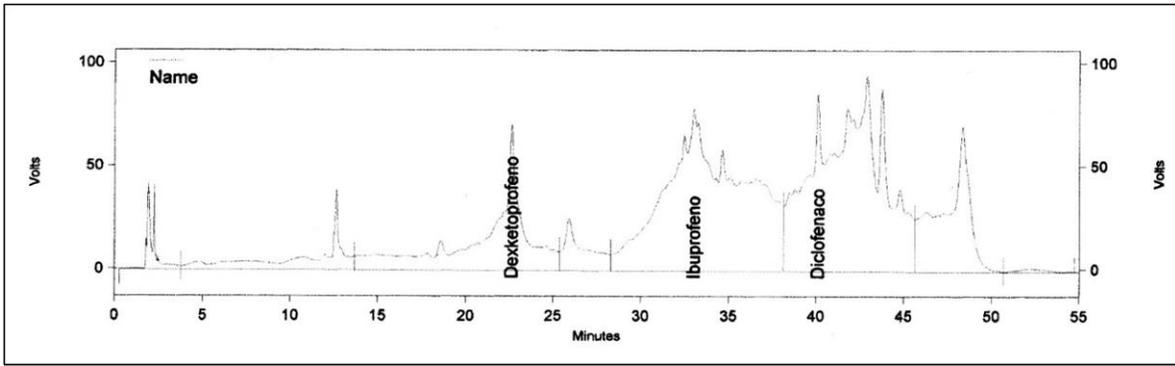


Figura 17. Fármacos detectados en la salida de la planta de tratamiento durante el primer muestreo en marzo 2014

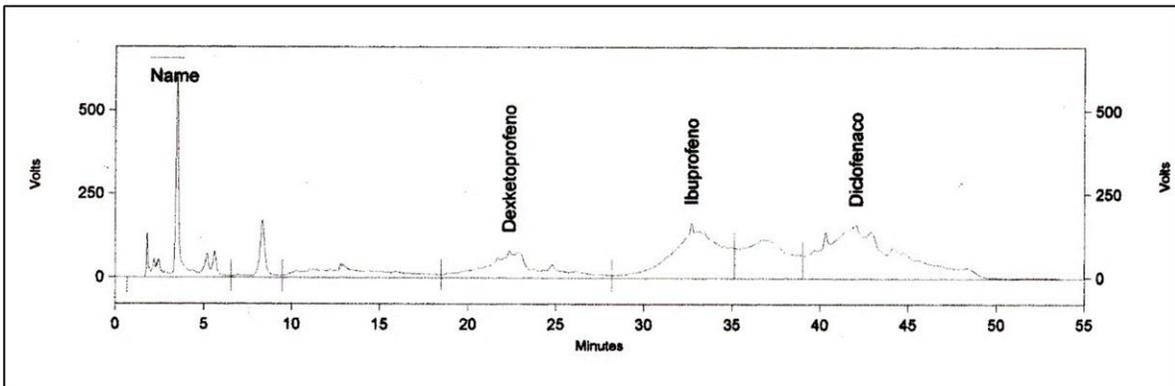


Figura 18. Fármacos detectados en la salida de la planta de tratamiento durante el tercer muestreo en agosto de 2014.