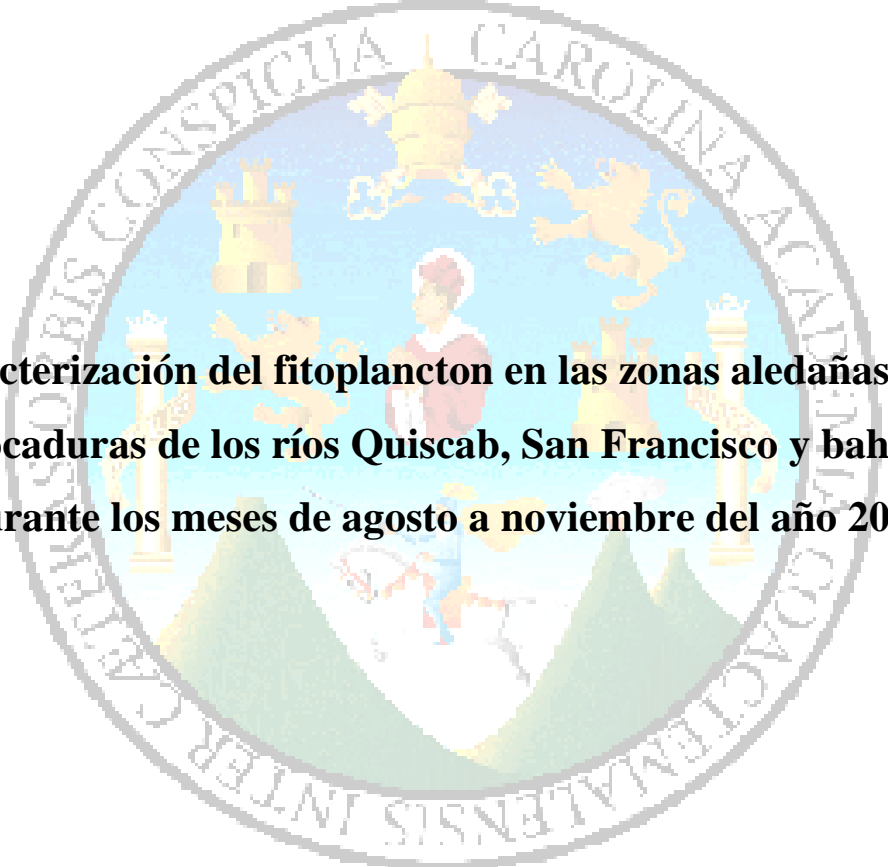


**Universidad de San Carlos de Guatemala
Centro de Estudios del Mar y Acuicultura**

Trabajo de Graduación

The seal of the University of San Carlos of Guatemala is a circular emblem. It features a central shield with a figure, surrounded by various symbols including a castle, a lion, and a cross. The Latin motto "SAPERE SUPREMO CONSPICUA CAROLINA ACADUMIA COACTEMALENSIS INTER" is inscribed around the perimeter of the seal.

**Caracterización del fitoplancton en las zonas aledañas a las
desembocaduras de los ríos Quiscab, San Francisco y bahía Jaibal
durante los meses de agosto a noviembre del año 2020**

Presentado por

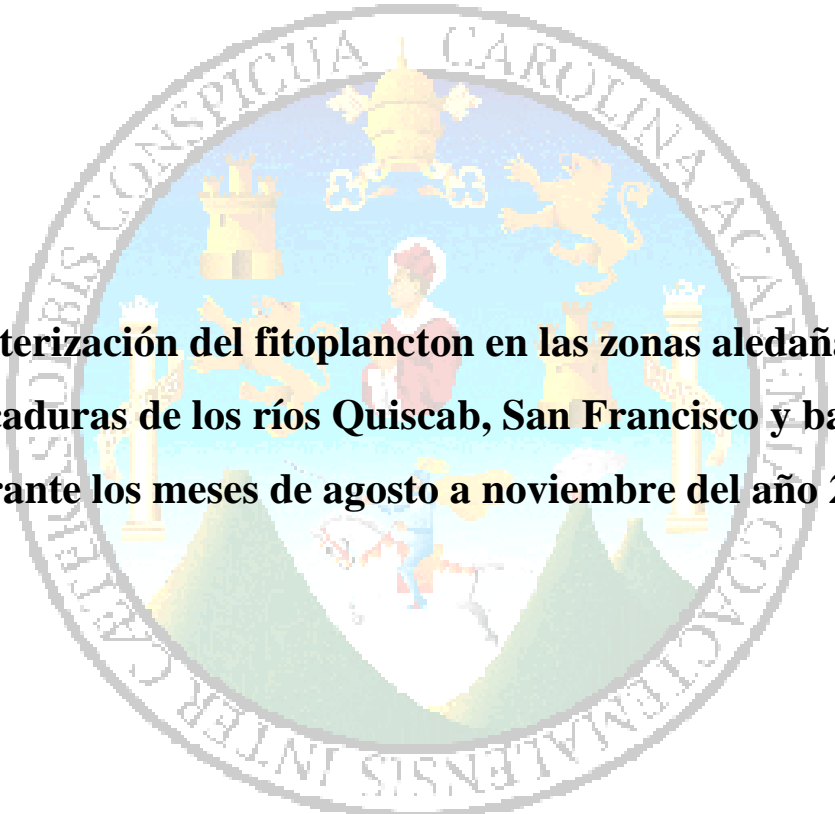
T. A. Luis Rodrigo Morales Marroquín

**Para otorgarle el título de
Licenciado en Acuicultura**

Guatemala, enero de 2022

**Universidad de San Carlos de Guatemala
Centro de Estudios del Mar y Acuicultura**

Trabajo de Graduación

The seal of the University of San Carlos of Guatemala is a circular emblem. It features a central figure of a woman in a red and white dress, possibly a saint or a historical figure, standing on a green hill. Above her is a golden crown and a shield with a lion. The seal is surrounded by a Latin inscription: "CAROLINA ACADEMIA COACQUEMENSIS INTER CETEROS SOBIS CONSPICUA".

Caracterización del fitoplancton en las zonas aledañas a las desembocaduras de los ríos Quiscab, San Francisco y bahía Jaibal durante los meses de agosto a noviembre del año 2020

Presentado por:

T.A. Luis Rodrigo Morales Marroquín

**Para otorgarle el título de
Licenciado en Acuicultura**

Asesor: M. Sc. Elsa María de Fátima Reyes Morales

Guatemala, enero de 2022

Universidad de San Carlos de Guatemala
Centro de Estudios del Mar y Acuicultura

Consejo Directivo

Presidenta	Dra. Juana Lorena Boix Morán
Secretario	Dr. Pedro Julio García Chacón
Representante Docente	M. Sc. Norma Edith Gil Rodas de Castillo
Representante del Colegio de Médicos Veterinarios, Zootecnistas y Acuicultores	Licda. Liliana Maricruz Maldonado Noriega
Representantes Estudiantiles	T. A. Karol Rubí Rivas Díaz T. A. Alejandra Raquel Contreras Perdomo

La directora del Centro de Estudios del Mar y Acuicultura -CEMA-, después de conocer el dictamen favorable del M.Sc. Erick Roderico Villagrán Colón, Coordinador Académico, sobre el trabajo de graduación del estudiante universitario **Luis Rodrigo Morales Marroquín**, titulado “Caracterización del fitoplancton en las zonas aledañas a las desembocaduras de los ríos Quiscab, San Francisco y bahía Jaibal durante los meses de agosto a noviembre del año 2020” da por este medio su aprobación a dicho trabajo. IMPRIMASE.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Dra. Juana Lorena Boix Morán
Directora



Guatemala, enero 2022

El Coordinador Académico del Centro de Estudios del Mar y Acuicultura -CEMA-, después de conocer el dictamen favorable de la asesora, M.Sc. Elsa María de Fátima Reyes Morales, al trabajo de graduación del estudiante **Luis Rodrigo Morales Marroquín**, titulado: “Caracterización del fitoplancton en las zonas aledañas a las desembocaduras de los ríos Quiscab, San Francisco y Bahía Jaibal durante los meses de agosto a noviembre del año 2020” da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

Atentamente,
“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



M.Sc. Erick Villagrán
Coordinador Académico



Guatemala, enero de 2022

Agradecimientos

A la Universidad de San Carlos de Guatemala

Por ser mi casa de estudio en la cual he podido desarrollarme como profesional para el servicio de Guatemala.

Al Centro de Estudios de Mar y Acuicultura

Por ser el lugar que me ha guiado a través de los conocimientos brindados para convertirme en un profesional en el campo de la limnología.

Al Departamento de Investigación y Calidad Ambiental y sus integrantes

Por ser el lugar donde he podido tener un crecimiento y aprendizaje a través de las experiencias vividas con sus integrantes: Elsa Reyes, Flor Barreno, Natanael Xaminez, Domingo Ujpán, y Joselyn Martínez.

A la M. Sc. Elsa María de Fátima Reyes Morales

Por compartirme sus conocimientos y ser mi guía durante todo este proceso de investigación, los cuales han servido para la elaboración de este documento.

A mi tía, Ana Chávez

Gracias por el apoyo moral y económico para poder realizar esta práctica, siendo ésta una gran oportunidad de crecimiento personal y profesional.

Dedicatoria

A Dios

Le doy gracias a Dios por mi vida, por estar a mi lado y darme las fuerzas necesarias para terminar este camino largo. Gracias por llenarme de bendiciones y de experiencias que han enriquecido, tanto mi vida personal, como profesional.

A mis padres

Víctor Hugo Morales y Lucrecia Marroquín, gracias por todo el apoyo que me han dado durante todos mis años de educación, por darme su amor para poderme convertir en la persona que soy y ser cada día mejor.

A mis hermanas

Gabriela Morales y Fernanda Morales, estoy agradecido por ayudarme cuando las he necesitado y apoyarme a través de sus consejos. Gracias por ser ejemplos en mi vida como mis hermanas mayores.

A mi abuela

Julia Hernández (QEPD), le quiero dar gracias por siempre desearme lo mejor y quererme mucho a pesar de la distancia, gracias por siempre tenerme en sus oraciones y desear que llegaré a ser un profesional de éxito.

A mis tías

Ana Chávez, Claudia Cota, Clara Luz Rodenas (QEPD), por siempre desearme lo mejor durante todos mis años de estudios en los distintos niveles académicos.

A mis amigos

Gracias a todos mis amigos, tanto de la universidad como del colegio, gracias por confiar en mí y darme ánimos para seguir adelante. Gracias por compartir momentos de felicidad que me motivaron a dar lo mejor y lograr este triunfo.

Resumen

El lago Atitlán está situado en el departamento de Sololá y es uno de los lagos más importantes de Guatemala debido a su importancia económica, social, y ambiental. Cabe mencionar, que el lago enfrenta una problemática ambiental, debido que percibe contaminantes como aguas residuales, escorrentía, desechos mineros y agroquímicos los cuales son un aporte de nutrientes que llegan al lago a través de sus principales afluentes, el río Quiscab y el río San Francisco.

El aporte de nutrientes en un cuerpo de agua acelera el proceso de eutrofización, causando una degradación ambiental, la cual se ve reflejada en el ecosistema y en la diversidad de especies del lago. Uno de los grupos que son más sensibles y utilizados para medir el nivel de eutrofización es el fitoplancton. Los cambios producidos por el aporte de nutrientes pueden observarse directamente en cambios de la riqueza y abundancia de géneros de micro algas presentes en el lago.

Durante la presente investigación se realizaron tres monitoreos de fitoplancton en los meses de agosto, septiembre y noviembre en las zonas aledañas a las desembocaduras de los ríos Quiscab y San Francisco, así como en la bahía Jaibal como un punto de control sin alteración antropogénica.

La investigación registró un total de 24 géneros, siendo la bahía Jaibal el sitio con mayor riqueza de los tres sitios muestreados, además este sitio presentó la mayor densidad promedio de micro algas, la cual se debe a la estabilidad que presentaban ciertas condiciones ambientales en el lugar. También se determinó que los grupos de microalgas con mayores densidades en los sitios fueron los grupos Bacillariophyceae y Cyanophyceae.

Cabe mencionar, que a pesar que el sitio bahía Jaibal presentó la mayor riqueza de géneros de fitoplancton, no hubo una diferencia significativa entre los tres sitios. Los tres sitios muestreados comparten un mismo ensamble de fitoplancton.

Con respecto al efecto que tienen los nutrientes y variables ambientales sobre las comunidades fitoplanctónicas, se determinó que no hay una relación directa con estas. Si bien se sabe que los nutrientes son un factor muy importante en los procesos de eutrofización, también se evidenció que existen otros factores que repercuten en el crecimiento de las microalgas, como lo es la

fotoinhibición y la disponibilidad de nutrientes. Esta última es un fenómeno muy presente en los sitios muestreados derivado de los contaminantes y materia orgánica que impide el ingreso de luz y, por consiguiente, la fotosíntesis.

Abstract

Lake Atitlán is located in the department of Sololá and is one of the most important lakes in Guatemala due to its economic, social, and environmental importance. It is worth mentioning that the lake faces an environmental problem, because it perceives pollutants such as sewage, runoff, mining waste and agrochemicals, which are a contribution of nutrients that reach the lake through its main tributaries, the Quiscab River and the San Francisco River.

The contribution of nutrients in a body of water accelerates the eutrophication process, causing an environmental loss, which is reflected in the changes in the ecosystem and species of the lake. One of the groups that are most sensitive and used to measure the level of eutrophication is phytoplankton. The changes produced by the supply of nutrients can be observed directly in changes in the richness and abundance of microalgae genera present in the lake.

During the present investigation, three phytoplankton surveys were carried out in the months of August, September and November in the areas surrounding the mouths of the Quiscab and San Francisco rivers, as well as in Jaibal Bay as a control point without anthropogenic alteration. Phytoplankton monitoring was carried out using POE-12 from the water quality laboratory of the research and environmental quality department of the Authority for the Sustainable Management of the Lake Atitlán Basin and its Environment -AMSCLAE-. Likewise, SOPs 7, 8 and 9 were used to determine nutrient concentrations and whether they had a relationship on the phytoplankton community of the sampled sites.

The investigation registered a total of 24 genera, being Jaibal Bay the site with the greatest richness of the three sampled sites, likewise, this site presented the highest average density of micro algae, which is due to the stability that certain environmental conditions presented in the place. It was also determined that the microalgae groups with the highest densities at the sites were the Bacillariophyceae and Cyanophyceae groups.

It is worth mentioning that despite the fact that the Jaibal Bay site presented the highest richness of phytoplankton genera, there was no significant difference between these in the three sites, therefore, it was determined that the three sampled sites share the same phytoplankton population.

Regarding the effect that nutrients and environmental variables have on phytoplankton communities, it was determined that there was no direct relationship with them. Although it is known that nutrients are a very important factor in eutrophication processes, it was also evidenced that there are other factors that affect the growth of microalgae, such as photoinhibition. The latter is a phenomenon very present in the sampled sites derived from pollutants and organic matter that prevents photosynthesis.

Índice de contenido

1.	Introducción	1
2.	Marco teórico y estado del arte	3
2.1	Marco teórico	3
2.2	Estado del arte	5
3.	Objetivos	6
3.1	Objetivo general	6
3.2	Objetivos específicos	6
4.	Hipótesis	7
5.	Materiales y métodos	8
5.1	Área de estudio	8
5.2	Tipo de investigación	8
5.3	Delimitación temporal y especial	9
5.3.1	Delimitación temporal	9
5.3.2	Delimitación especial	9
5.4	Variables	9
5.5	Muestreo y selección de la muestra	10
5.6	Diseño experimental	11
5.7	Procedimiento	13
5.8	Análisis de datos	14
6.	Resultados y discusión	16
7.	Conclusiones	27

8.	Recomendaciones	28
9.	Bibliografía	29
10.	Anexo	33

Índice de Figuras

<i>Figura 1.</i>	Puntos de muestreo en el lago Atitlán	8
<i>Figura 2.</i>	Recolección de muestra de fitoplancton con manguera	10
<i>Figura 3.</i>	Desembocadura del río Quiscab	12
<i>Figura 4.</i>	Desembocadura del río San Francisco	12
<i>Figura 5.</i>	Zona aledaña a la bahía Jaibal	13
<i>Figura 6.</i>	Sedimentación de fitoplancton en probeta	14
<i>Figura 7.</i>	Riqueza de géneros por sitio de muestreo	16
<i>Figura 8.</i>	Riqueza por clases en los puntos de muestreo	17
<i>Figura 9.</i>	Densidad promedio en los sitios de muestreo	17
<i>Figura 10.</i>	Densidad promedio por punto de muestreo en la bahía Jaibal, Quiscab y San Francisco	18
<i>Figura 11.</i>	Distribución espacial de las condiciones físicas en la bahía Jaibal, Quiscab y San Francisco	19
<i>Figura 12.</i>	Distribución espacial de los nutrientes en la bahía Jaibal, Quiscab y San Francisco	20
<i>Figura 13.</i>	Análisis de correspondencia canónica CCA, sitios de muestreo; puntos de muestreo; parámetros fisicoquímicos y géneros de especies	21
<i>Figura 14.</i>	Análisis de Componentes Principales PCA. Sitios de muestreo y géneros de especies	22
<i>Figura 15.</i>	Análisis de similaridad según el índice de Jaccard	23

Índice de Tablas

Tabla 1.	<i>Variables físicas, químicas y biológicas</i>	9
Tabla 2.	<i>Códigos utilizados para los puntos de muestreo</i>	11

Índice de anexos

<i>Anexo 1.</i>	Riqueza total de fitoplancton a nivel de género recolectados durante agosto a noviembre 2020, en los sitios bahía Jaibal (Jai), Quiscab (Qs) y San Francisco (SF)	33
<i>Anexo 2.</i>	Densidades promedio (Org/L) de géneros de fitoplancton en los sitios de muestreo bahía Jaibal (Jai), Quiscab (Qs) y San Francisco (SF)	34

1. Introducción

El lago Atitlán se considera entre los cuerpos de agua más importantes de Guatemala, comprendiendo una superficie de 125.77 km², el perímetro de 101.67 km y una profundidad aproximada de 327.56 metros (Reyes, Ujpán, & Valiente, 2018). Alrededor de este lago se ha asentado aproximadamente 300,000 personas, distribuidas en los diferentes municipios que se encuentran en la cuenca del lago y las cuales provocan un impacto directo e indirecto sobre el lago Atitlán.

Este cuerpo de agua es de gran importancia en el departamento de Sololá y del país, debido a sus aspectos ecológicos, sociales y económicos. Además, es uno de los reservorios de agua dulce más grande de la región.

La calidad ambiental del lago Atitlán se ha deteriorado en gran medida y se debe a las actividades humanas que se desarrollan alrededor del lago. Entre estas actividades se destaca la descarga de aguas residuales, tala de la cobertura boscosa, arrastre del suelo por escorrentía, aumento de uso de detergentes y fertilizantes (Oliva, et. al, 2010).

El ingreso de contaminantes repercute en las comunidades biológicas del cuerpo de agua. Siendo una de las más afectadas las comunidades planctónicas, en especial el fitoplancton. El aporte excesivo de nutrientes de fosforo y nitrógeno acelera la producción primaria, la cual provoca un florecimiento de micro algas como las cianobacterias. El crecimiento de este grupo algal es peligroso debido a que puede ocasionar daños a la salud humana (Rejmánková, Komárek, Dix, Komárková, & Girón, 2011).

Desde el año 2009 se tienen estudios que han presentado que existen florecimientos de microalgas, especialmente cianobacterias. Los florecimientos se atribuyen a las cargas de nutrientes provenientes de aguas residuales sin tratamiento, erosión de suelos y a otras actividades como la agricultura a través de la escorrentía (Rejmánková, Komárek, Dix, Komárková, & Girón, 2011). Los contaminantes como fertilizantes, aguas residuales, materia orgánica y metales pesados, son transportados hacia el lago Atitlán por los ríos Quiscab y San Francisco (Barrientos,& Benítez, 1997). Gil (2015), reportó que en el año 2013 existían altas concentraciones de algas del filo Cianobacteria en las desembocaduras de los ríos Quiscab y San Francisco.

Un aspecto que se debe destacar en la problemática de los contaminantes en los ríos, es que Guatemala es un país que depende de las actividades agrícolas. Siendo una de las actividades que generan mayores ingresos económicos a las comunidades. El problema surge en que esta actividad genera grandes impactos al ambiente, por el vertido de contaminantes. Entre estos se puede destacar el uso de agroquímicos, fertilizantes orgánicos y estiércol. El uso de estos productos aporta nitrógeno, fosforo que promueven la eutrofización de las aguas (Bocanegra, 2013).

Cabe mencionar que las aguas residuales por lo general son vertidas directamente a los cuerpos de agua. El impacto que genera dicha acción es negativo, produce una saturación de materia orgánica, incremento de patógenos y aporte de nutrientes. Estos efectos se ven reflejados en el deterioro del ambiente, generando pérdidas económicas, sitios recreativos y vista paisajística. En las comunidades fitoplanctónicas el efecto se puede observar en el cambio de la composición, abundancia y variabilidad espacial entre las especies. Este efecto se debe a que las aguas residuales tienen una concentración alta de nutrientes como amonio y fosforo soluble (Neyra, & Yucra, 2017).

El presente estudio evidencia la problemática del aporte de contaminantes por parte de los ríos Quiscab y San Francisco a través de los monitoreos realizados en las zonas aledañas de los puntos de muestreos mencionados. Las altas cargas de nutrientes tienen un impacto sobre las comunidades fitoplanctónicas y esto resultado del efecto que tiene los contaminantes sobre la riqueza de especies registradas en el presente estudio, asimismo, con las densidades que se reportan, las cuales en el sitio control, bahía Jaibal, reportaron las mayores densidades en todo el estudio.

2. Marco teórico y estado del arte

2.1 Marco teórico

Cuerpos lenticos

Dentro de los cuerpos acuáticos lénticos podemos incluir los lagos, lagunas y embalses. Estos cuerpos de agua son objeto de estudio dentro de la limnología. Los cuerpos de agua lénticos son sistemas abiertos y tienen una interacción continua con su entorno. Los lagos o lagunas, según el caso, forman parte de un sistema mayor de drenado, llamado cuenca. Todas las interacciones que tienen los lagos, lo hacen un sistema complejo de entender. Debido a todas las interacciones que tienen estos cuerpos de agua se debe de estudiar su entorno, sus entradas y salidas (Roldán, & Ramírez, 2008).

Contaminación de aguas continentales

La contaminación hídrica representa una serie de consecuencias negativas en los cuerpos de agua, reduciendo la disponibilidad de agua y la calidad de ésta. Los procesos de contaminación surgen de dos tipos, estos pueden ser por fuentes puntuales y/o difusas. Las fuentes puntuales son puntos continuos de generación de contaminantes, como las aguas residuales. Por otro lado, las fuentes difusas son un conjunto de fuentes pequeñas de descargas que no son localizables, ni continuas. Las fuentes de contaminación difusa tienen un acceso a los cuerpos de agua por derrame o filtración en los suelos y está relacionada directamente con actividades agrícolas (González, 2007).

En la mayoría de las ciudades y municipios se realiza la práctica de descargar las aguas residuales en el cuerpo de agua más cercano. Normalmente estas aguas al ingresarse al cuerpo de agua no son tratadas. La realización de estas prácticas no toma en cuenta las consecuencias ambientales que se tienen y como estas prácticas repercuten en las economías de las comunidades. Dichas situaciones van muy relacionadas con que los líderes municipales no tienen el conocimiento de los impactos causados (Chalarca, Mejía, & Aguirre, 2007).

Las cuatro fuentes principales de aguas residuales son: aguas domésticas o urbanas, aguas residuales industriales, escorrentía de usos agrícolas y aguas pluviales. Actualmente el impacto que se tiene por la escorrentía debido a las prácticas agrícolas constituye a una de las mayores

causas de eutrofización de lagos y pantanos debido al uso de fertilizantes y pesticidas (Ramalho, 1996).

El uso de fertilizantes es la forma principal para intensificar la actividad agrícola, donde el nutriente más utilizado es el nitrógeno. La utilización de este elemento tiene un efecto directo en los rendimientos y la calidad de los productos (Tassara, y Ortega, 2003). Se debe resaltar los efectos del nitrógeno sobre el medio ambiente, ya que puede causar la eutrofización de los cuerpos de agua, conllevando a un crecimiento excesivo de algas y acidificación de suelos (Silva, 2010).

Eutrofización

La eutrofización es el proceso por el cual hay un abastecimiento desmedido de nutrientes, como nitrógeno y fósforo a los cuerpos de agua, lo cual provoca un crecimiento excesivo de microalgas. Este crecimiento de micro algas reduce la calidad del agua, causando un descenso en los niveles de oxígeno en los cuerpos de agua (Aranda, 2004).

Fitoplancton

El plancton se divide en dos grupos, el fitoplancton y el zooplancton. El fitoplancton está compuesto por organismos microscópicos, flotan libremente en el agua y son las bases de las cadenas tróficas debido a que son productores primarios. El fitoplancton es uno del grupo más estudiados, esto se debe a que es utilizado como indicador del estado del agua en los cuerpos continentales (Wetzel, 2001; Roldán, & Ramírez, 2008).

Fitoplancton como bioindicador

El fitoplancton puede utilizarse como indicador de calidad del agua debido a que ciertas especies son más tolerantes a factores contaminantes. La proliferación de especies como *Microcystis* pueden asociarse al aporte de nutrientes que percibe el sistema acuático por parte de sus afluentes (Luján, 2000).

2.2 Estado del arte

Un estudio realizado en el arroyo Carabassa, Buenos Aires, Argentina, evaluó el impacto de la contaminación sobre los organismos del fitoplancton. Este estudio determinó que el deterioro de las aguas afecta a las comunidades fitoplanctónicas bajo altas concentraciones de metales y materia orgánica. En dicho estudio se observó que los lugares con mayor contaminación, los grupos más abundantes fueron las Chlorophyceae con codominancia de Euglenophyceae y Cyanophyceae (Nannavecchia, 2016).

Con respecto a Guatemala, se realizó una investigación donde se caracterizó y evaluó la calidad del agua de los ríos Quiscab y San Francisco, afluentes del lago Atitlán. Dicho estudio determinó que ambos ríos transportan grandes cantidades de nutrientes y materia orgánica al lago, lo cual tiene un impacto negativo en la comunidad fitoplanctónica, al haber registrado una alta presencia de cianobacterias del género *Limnorphis* en las desembocaduras de los ríos Quiscab y San Francisco. No obstante, tal estudio comprobó que no existía diferencia de géneros de fitoplancton entre el río Quiscab el San Francisco (Gil, 2015).

La eutrofización del lago Amatitlán, debido al exceso de nutrientes que ingresan, ha causado proliferaciones del género *Microcystis* (Cianobacteria). A través de bioensayos, utilizando este género, han determinado que el fósforo es el nutriente limitante en los procesos bioquímicos, ya que se ha registrado que cuando este nutriente decrece en un 90% la biomasa de este género decrece de igual forma (Rodas, et. al, 2020).

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

- Caracterizar la comunidad fitoplanctónica en las zonas aledañas a las desembocaduras de los ríos Quiscab, San Francisco y bahía Jaibal, entre los meses de agosto a noviembre 2020.

3.2 Objetivos específicos

- Determinar la densidad y riqueza de fitoplancton en las zonas aledañas a las desembocaduras de los ríos Quiscab, San Francisco y bahía Jaibal, en la columna de agua.
- Correlacionar parámetros físicos y químicos con la distribución de la densidad de las comunidades fitoplanctónicas.
- Evaluar las diferencias que existen en las comunidades fitoplanctónicas entre los ríos Quiscab, San Francisco y la bahía de Jaibal.

4. Hipótesis

La riqueza y densidad que presentan ciertos grupos fitoplanctónicos en las zonas aledañas a las desembocaduras de los ríos Quiscab, San Francisco y bahía Jaibal están asociadas directamente a las condiciones fisicoquímicas y ambientales encontradas en las zonas del estudio.

5. Materiales y métodos

5.1 Área de estudio

El estudio se realizó en el lago Atitlán, situándose este lago dentro del departamento de Sololá en el occidente de Guatemala (Figura 1).

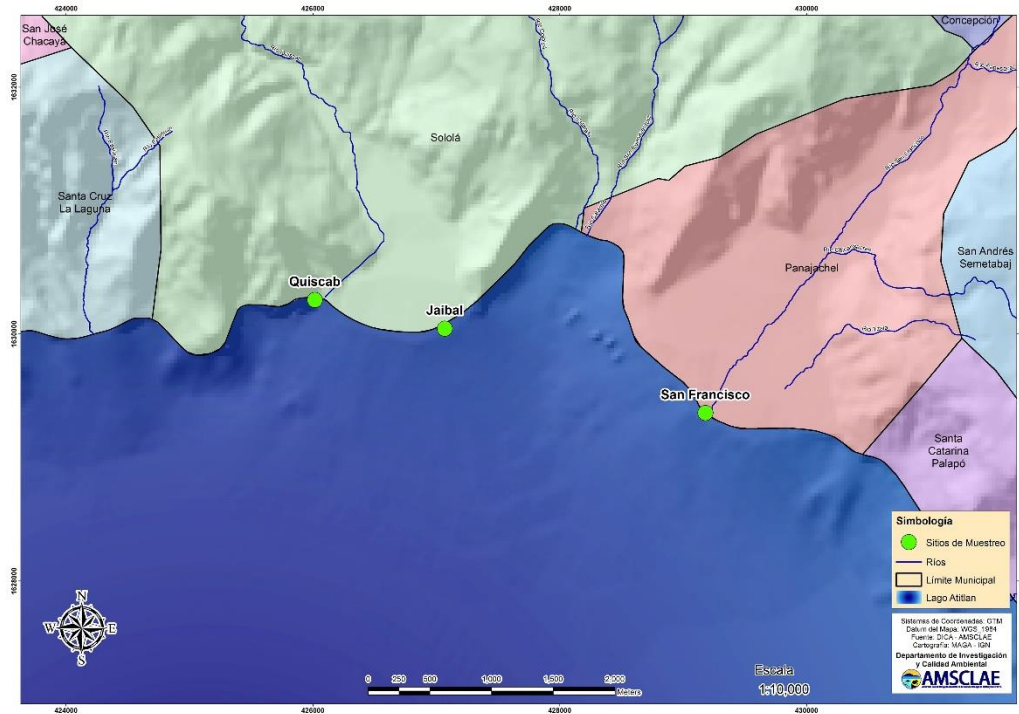


Figura 1. Puntos de muestreo en el lago Atitlán (Departamento de Investigación y Calidad Ambiental [DICA]; Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Atitlán y su Entorno [AMSCLAE], 2020)

5.2 Tipo de investigación

La investigación que se desarrolló es de tipo cuantitativo y cualitativo. La caracterización de los grupos de micro algas identificados en las zonas aledañas a los ríos Quiscab, San Francisco y bahía Jaibal presenta la parte cualitativa de la investigación. El registro de las mediciones de los parámetros fisicoquímicos y densidades de los géneros de micro algas se consideran como la parte cuantitativa de la investigación. Sumado a ello se realizó una serie de análisis descriptivos y estadísticos con el fin de poder presentar los datos obtenidos de una mejor manera.

5.3 Delimitación temporal y espacial

5.3.1 Delimitación temporal

Los muestreos se realizaron durante los meses de agosto, septiembre y noviembre del año 2020. En cada mes se tomaron muestras de fitoplancton y midieron los parámetros fisicoquímicos en cada sitio.

5.3.2 Delimitación espacial

La investigación se realizó en las zonas aledañas a las desembocaduras del río Quiscab, río San Francisco y bahía Jaibal, ubicados en el lago Atitlán, departamento de Sololá, Guatemala.

La desembocadura del río Quiscab se encuentra ubicada en la coordenada GTM: N1630277 O 426015; mientras las coordenadas del río San Francisco son: N 1629361 O 429180. La bahía Jaibal fue seleccionada como punto de control al no presentar un impacto directo de actividades antropogénicas, las coordenadas para este sitio fueron N 1630045 O 427068 (Figura 1).

5.4 Variables

Las variables dependientes que se determinaron para este estudio fueron la riqueza y densidad de algas, en dichas variables se analizó la relación que tiene con las variables independientes, las cuales son parámetros fisicoquímicos presentados en los sitios de muestreo (Tabla No.1).

Tabla No. 1

Variables físicas, químicas y biológicas

Tipo de variable	Variable	Indicador
Variables dependientes	Riqueza	Número de especies
	Densidad	Número de organismos por litro
Variables independientes	Clorofila <i>a</i>	µg/l
	Saturación de oxígeno	%
	Temperatura	°C
	Sólidos disueltos totales	mg/l
	pH	A dimensional
	Amonio (NH ₄ -N)	mg/l
	Nitratos (NO ₃ ⁻² -N)	mg/l
	Fosfatos (PO ₄ ⁻³ -P)	mg/l

5.5 Muestreo y selección de la muestra

El muestreo se realizó según Procedimiento Operacional Estándar POE-12 “Análisis de plancton” del laboratorio de calidad de aguas del Departamento de Investigación y Calidad Ambiental -DICA- de la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Atitlán y su Entorno.

Para la recolección de las muestras de fitoplancton en la columna de agua del punto b, c, d, e, f y g, se utilizó una manguera de ¼” de diámetro, y una botella de Van Dorn de 3.2 litros para los puntos “a” de cada sitio. Posteriormente las muestras de agua se pasaron por una red de fitoplancton de 20 µm y se almacenaron en un frasco oscuro que contenía 1 ml de lugol al 20% (Figura 2).

Las muestras de nutrientes de cada punto se obtuvieron del agua filtrada de las muestras de fitoplancton. Las muestras fueron almacenadas en frascos transparentes y transportadas a 4 °C para luego ser analizadas en el laboratorio.

Los parámetros físicos se midieron *in situ* utilizando una sonda multiparamétrica YSI Pro DSS (Tabla No. 1).



Figura 2. Recolección de muestra de fitoplancton con manguera

5.6 Diseño experimental

Se realizaron tres transectos longitudinales con diferentes ángulos a partir de las desembocaduras de los ríos Quiscab (Figura 3), San Francisco (Figura 4) y bahía Jaibal (Figura 5). Los ángulos de cada línea longitudinal fueron de 45°, 90° y 135°. Asimismo, en cada uno de los transectos se establecieron dos puntos de muestreo, existiendo entre cada punto una distancia de diez metros. Finalmente, en la desembocadura se estableció otro sitio (punto a). De tal forma que los códigos según el sitio de muestreo quedaron de la siguiente forma (Tabla No. 2):

Tabla No. 2

Códigos utilizados para los puntos de muestreo

Código	Ángulo	Distancia (m)
A	Desembocadura	
B	45°	10
C	45°	20
D	90°	10
E	90°	20
F	135°	10
G	135°	20

En cada punto establecido se recolectó una muestra de fitoplancton, una muestra de agua para el análisis de nutrientes y se midieron los parámetros físicos.

La totalidad del número de muestras recolectadas durante los tres meses de muestreo fueron 21 en bahía Jaibal, 15 para la zona aledaña al río Quiscab y 18 muestras para la zona aledaña al río San Francisco. Las diferencias del número total de muestras se debieron a condiciones ambientales en los sitios de muestreo, principalmente oleaje.

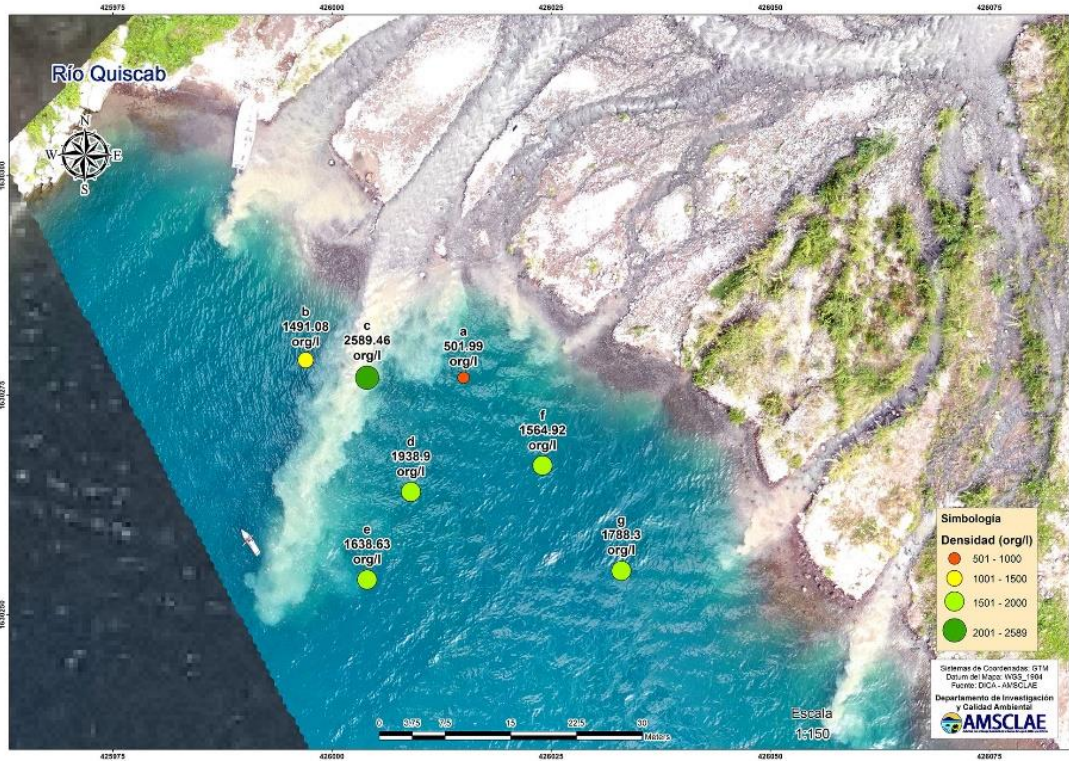


Figura 3. Desembocadura del río Quiscab

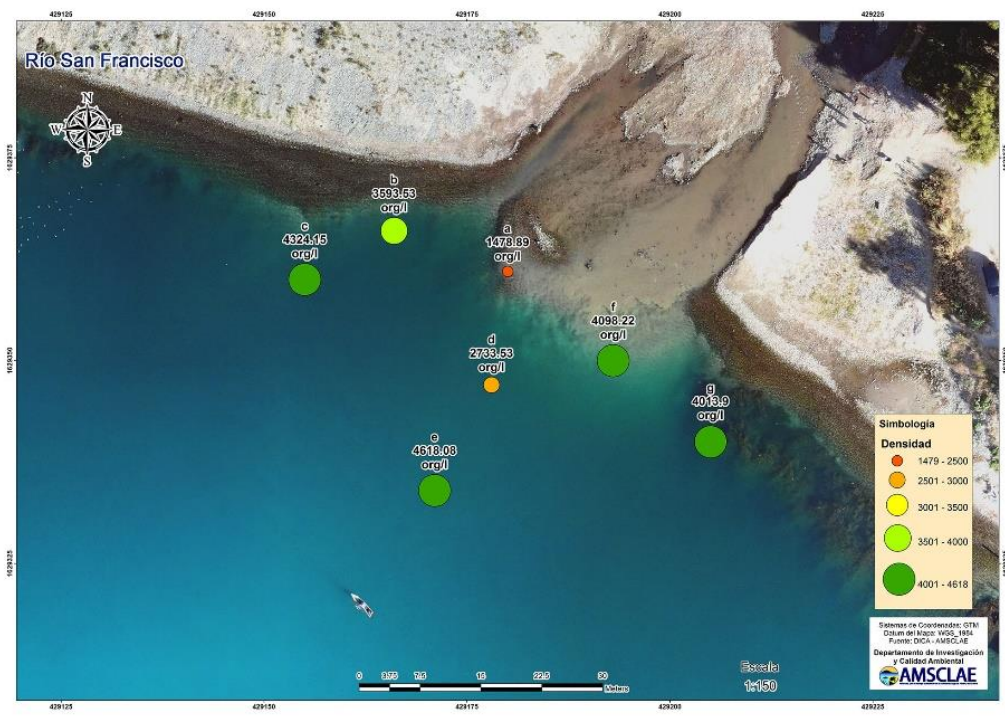


Figura 4. Desembocadura del río San Francisco

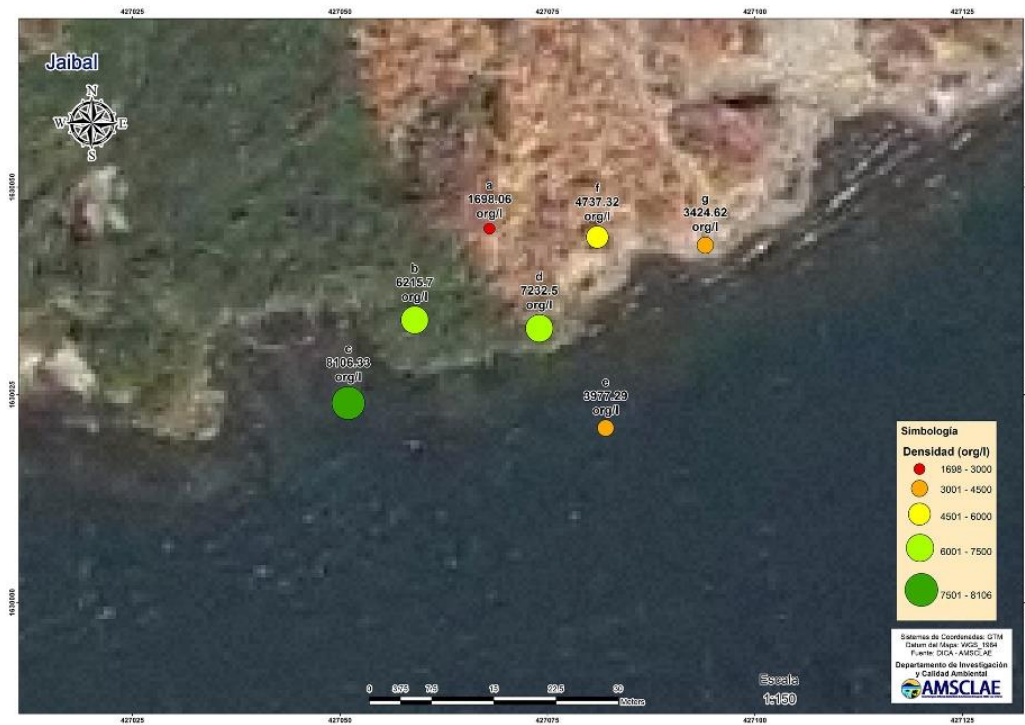


Figura 5. Zona aledaña a la bahía Jaibal

5.7 Procedimiento

Las muestras de fitoplancton luego de ser recolectadas, al ingresar al laboratorio se vertieron en una probeta, la cual se colocó en una superficie plana y con ausencia de luz durante un periodo de 24 horas para provocar una sedimentación (Figura 6).

Luego de haber pasado el periodo de sedimentación, la muestra se decantó utilizando una pipeta, hasta obtener 10 ml de la muestra original. El contenido final de la muestra se guardó dentro de un vial de vidrio etiquetado con la información del sitio (sitio, fecha de muestreo, hora, volumen inicial, volumen final).



Figura 6. Sedimentación de fitoplancton en probeta

El conteo de fitoplancton se realizó utilizando una cámara de Sedgewick-Rafter y con la ayuda de un microscopio. Para ello la muestra se agitó y se tomó un 1 ml con una pipeta Pasteur que luego se depositó en la cámara. Con la muestra en la cámara se cubrió con un cubreobjetos asegurándose que no quedaran burbujas, montada la muestra se procedió a realizar una revisión rápida de los géneros con el microscopio. Finalmente se realizaron los conteos, utilizando el aumento de 40 x 10, y haciendo transectos en la cámara de arriba hacia abajo y de derecha hacia izquierda.

El conteo e identificación se finalizó cuando se contaron 300 organismos divididos en 3 repeticiones, en las cuales al finalizar se devolvió la muestra al vial que contenía la muestra completa (Arriola, Reyes, & Javier, 2017).

Asimismo, se emplearon los Procesos Operacionales Estandarizados POE 7, 8 y 9, para medir la concentración de los nutrientes evaluados. Esta medición se realizó por medio de espectrofotometría utilizando un espectrofotómetro UV-visible (García, Díaz, & Reyes, 2018).

5.8 Análisis de datos

La riqueza se determinó mediante el listado de especies de cada conteo realizado y la densidad de organismos por litros se determinó a través de la siguiente fórmula:

$$\text{Densidad} \left(\frac{\text{Org}}{\text{L}} \right) = \frac{\text{Cantidad de organismos} * \text{Vol. Final} * 1000}{\text{Vol. Contado} * \text{Vol. Inicial}}$$

Asimismo, se utilizaron gráficas de barras para representar la riqueza por sitio y puntos de muestreo; y abundancia por sitio y por puntos de muestreo. Las gráficas se desarrollaron utilizando el programa Microsoft Excel®.

Los análisis estadísticos empleados para la investigación fueron el análisis de correspondencia canónica (CCA), empleado para establecer una relación entre las variables biológicas y las ambientales, el análisis de componentes principales (PCA) y el Índice de Similaridad de Jaccard, los cuales se utilizaron para determinar la diferencia entre los sitios estudiados. Para estos análisis se empleó el programa Past4.03.exe.

6. Resultados y discusión

Caracterización de la comunidad fitoplanctónica

Riqueza

La riqueza de los sitios de estudio oscilo entre 19 y 15 géneros. La bahía Jaibal, presentó la mayor riqueza en comparación con los otros dos sitios (Figura 7). La riqueza por punto de muestreo en cada sitio osciló entre los 19 y 10 géneros (Figura 8 y Anexo 1). Siendo los géneros *Fragilaria* (Bacillariophyceae), *Aulacoseira* (Bacillariophyceae) y *Limnoraphis* (Cyanophyceae), los que registraron las mayores densidades durante los muestreos (Anexo 2).

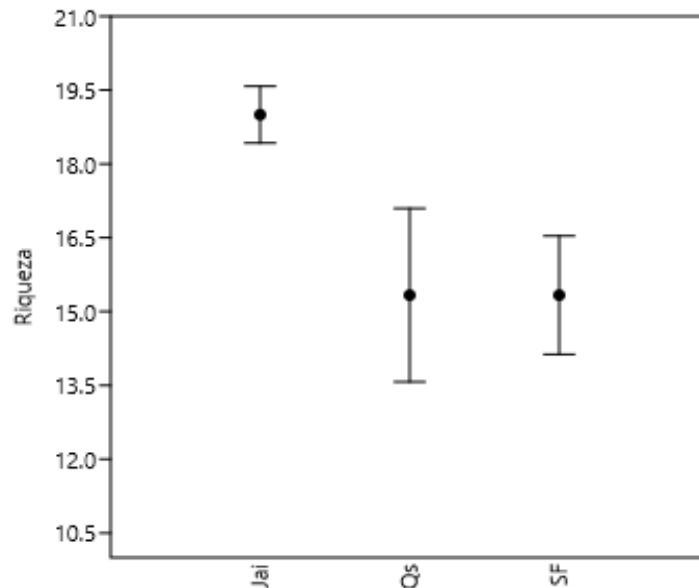


Figura 7. Riqueza de géneros por sitios de muestreo. Jaibal (Jai), Quiscab (Qs) y San Francisco (SF)

La clase Bacillariophyceae registró la mayor riqueza con siete géneros en los tres sitios de muestreo. La segunda clase con mayor riqueza fue la clase Chlorophyceae con siete géneros en la bahía Jaibal y seis géneros en las zonas aledañas a las desembocaduras de los ríos (Figura 2).

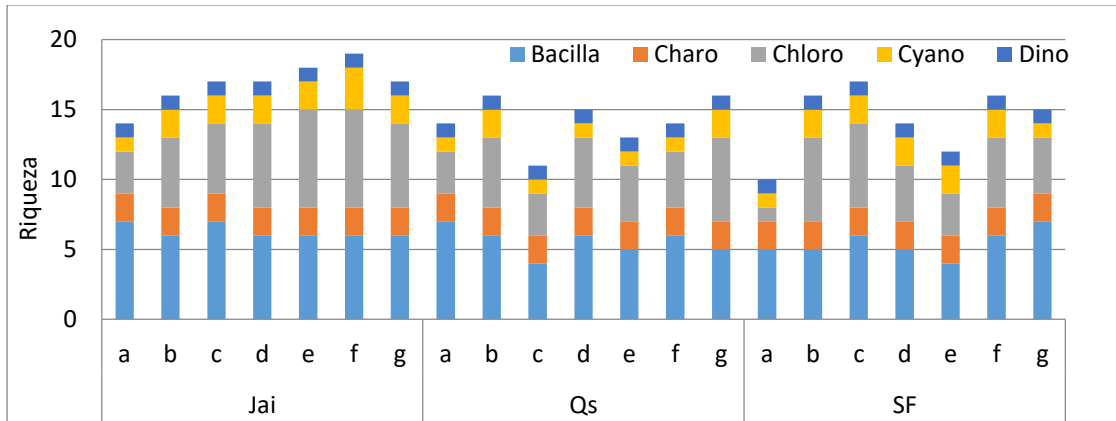


Figura 8. Riqueza por clases en los puntos de muestreo. Jaibal (Jai), Quiscab (Qs) y San Francisco (SF). Bacilla (Bacillariophyceae), Charo (Charophyceae), Chloro (Chlorophyceae), Cyano (Cyanophyceae) y Dino (Dinophyceae)

Densidad

La mayor densidad se registró en el sitio de muestreo ubicado en Jaibal con 5,106.26 Org./L, seguido del río San Francisco con 3,521.63 org./L y río Quiscab con 1,555.88 Org./L (Figura 9).

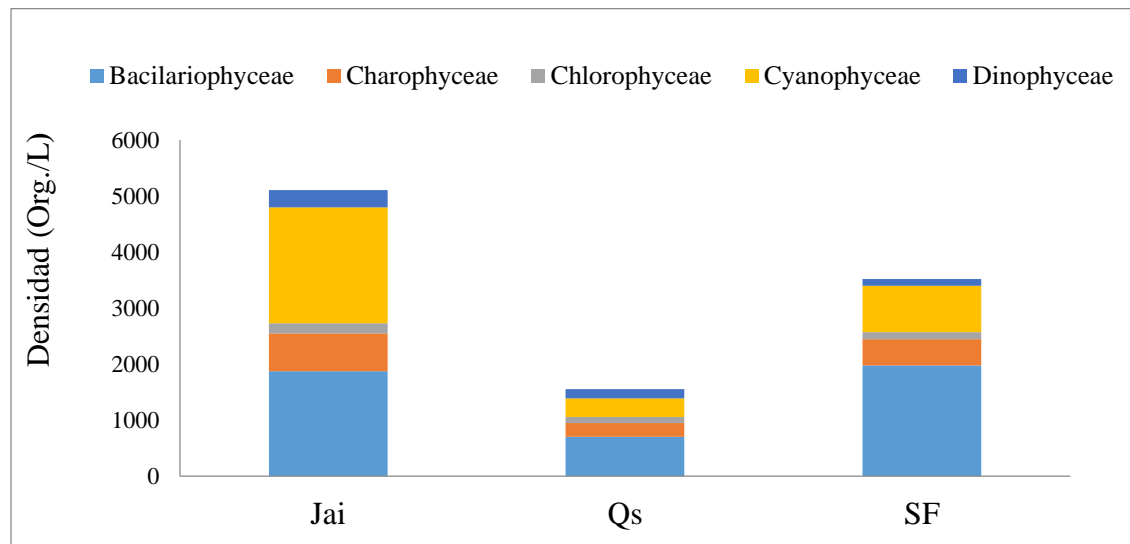


Figura 9. Densidad promedio en los sitios de muestreo. Jaibal (Jai), Quiscab (Qs) y San Francisco (SF)

En el sitio de muestreo de Jaibal, el punto que tuvo la mayor densidad fue el punto “c” con 8,106.32 Org. /L). En el sitio de muestreo río Quiscab, el punto que obtuvo la mayor densidad fue el punto “c” con 2,589.46 Org. /L y en el sitio de muestreo de San Francisco, el punto con mayor densidad fue el punto “e” con 4,618.07 Org. /L (Figura 10).

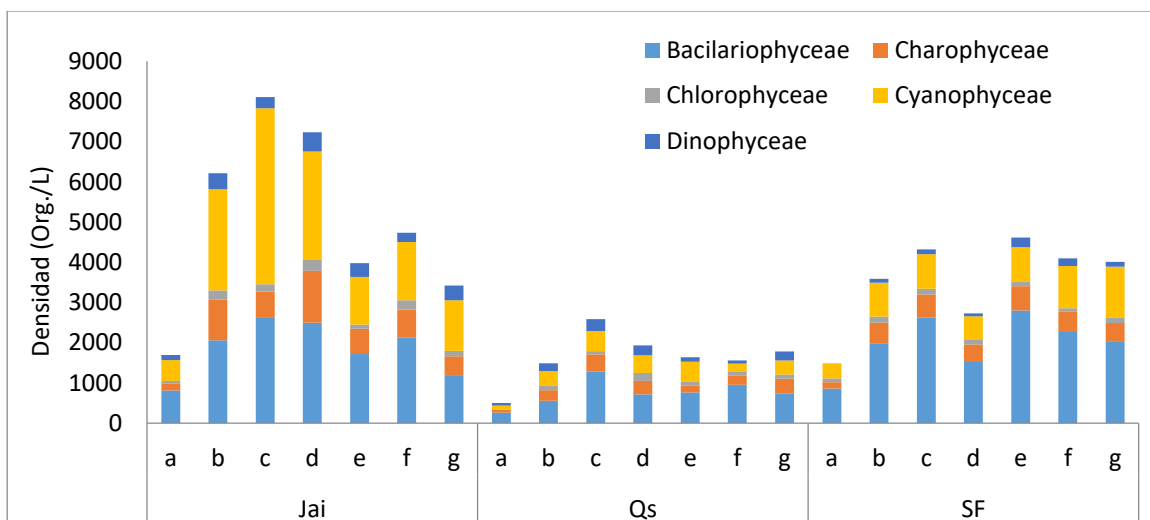


Figura 10. Densidad promedio por punto de muestreo en la bahía de Jaibal (Jai), Quiscab (Qs) y San Francisco (SF)

Caracterización fisicoquímica

La clorofila *a* en la bahía Jaibal osciló entre 0.704-13.118 $\mu\text{g/l}$, en la desembocadura del río Quiscab osciló entre 0.484-4.75 $\mu\text{g/l}$ y en la desembocadura del río San Francisco osciló entre 0.528- 14.24 $\mu\text{g/l}$. La saturación de oxígeno osciló entre 77.24-91.90%, la temperatura entre 21.561-24.354°C, los sólidos totales disueltos oscilaron entre 163.749-244.42 mg/l y finalmente, el pH osciló entre 8.24-8.89 (Figura 11).

Las concentraciones de nutrientes fueron muy variables entre los tres sitios de muestreo. En la bahía Jaibal el amonio osciló entre 11.122-38.956 $\mu\text{g/l}$, los nitratos oscilaron entre 0.441 -5.641 $\mu\text{g/l}$ y los fosfatos oscilaron entre 1.094-13.198 $\mu\text{g/l}$. En la desembocadura del río Quiscab el amonio osciló entre 4.600-171.279 $\mu\text{g/l}$, los nitratos oscilaron entre 4.276-137.402 $\mu\text{g/l}$ y los fosfatos oscilaron entre 2.344-25.649 $\mu\text{g/l}$. Finalmente, en la desembocadura del río San Francisco el amonio osciló entre 2.786-596.262 $\mu\text{g/l}$, los nitratos oscilaron entre 1.805-78.147 $\mu\text{g/l}$ y los fosfatos oscilaron entre 1.094-257.063 $\mu\text{g/l}$ (Figura 12).

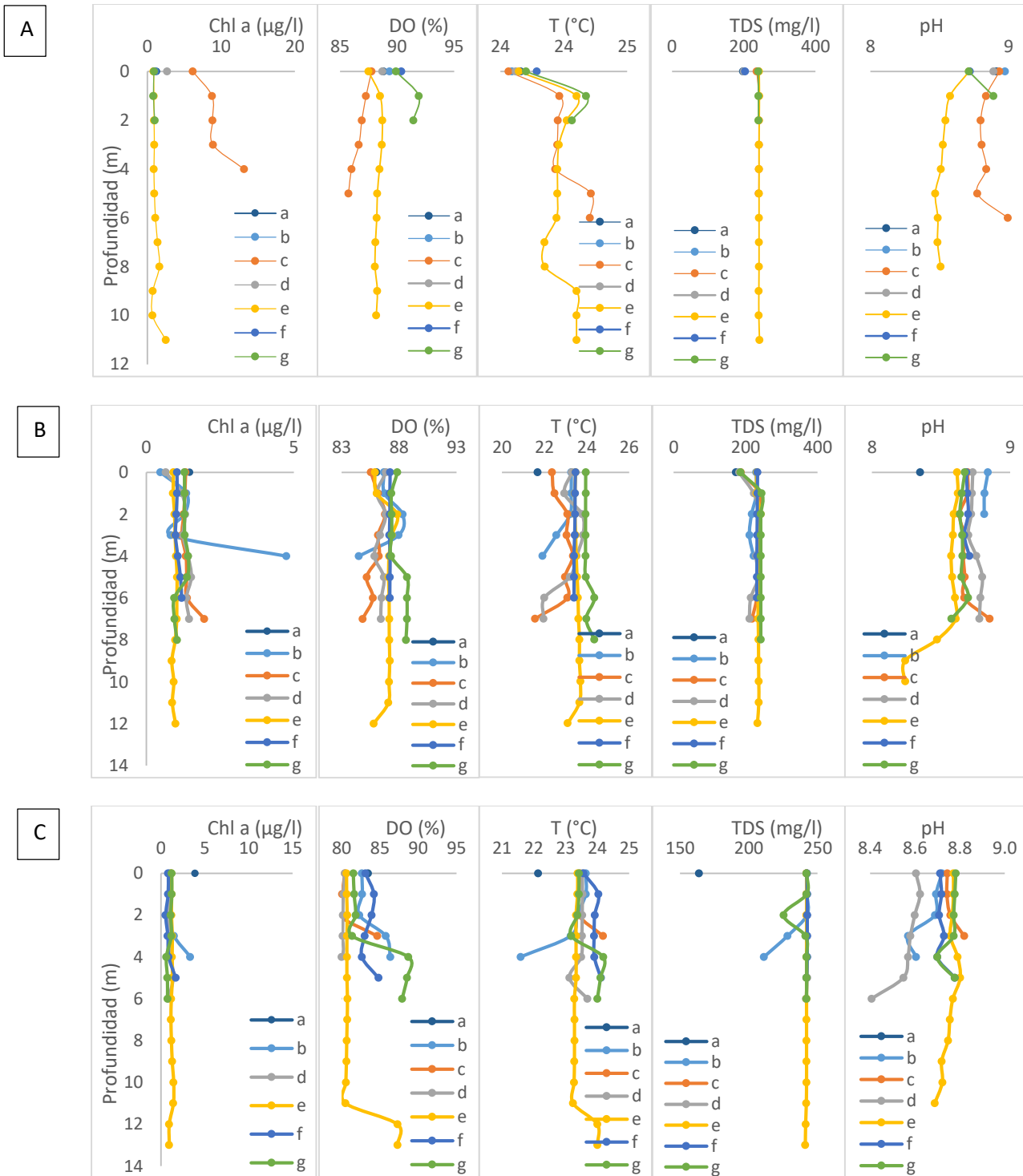
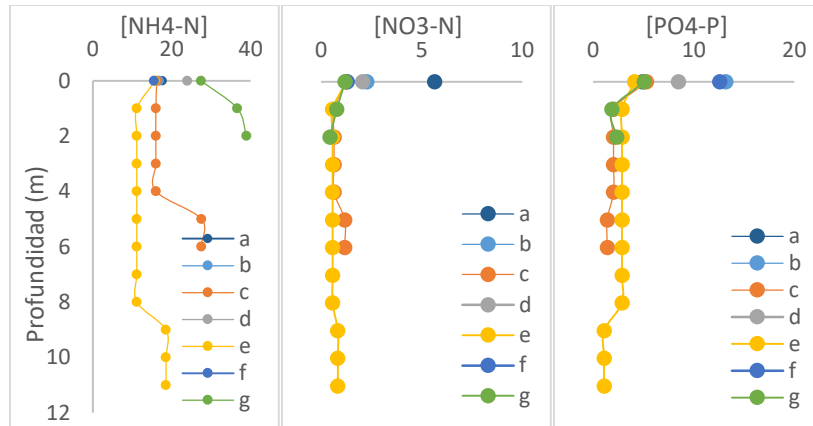
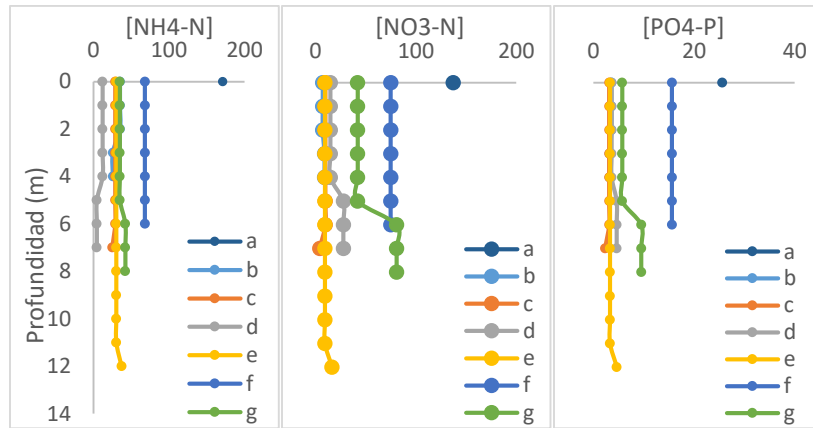


Figura 11. Distribución espacial de las condiciones físicas en la bahía Jaibal (a), Quiscab (b) y San Francisco (c). Clorofila (Chl a), Saturación de oxígeno (DO), temperatura (T), sólidos disueltos totales (TDS) y potencial de hidrogeno (pH)

A



B



C

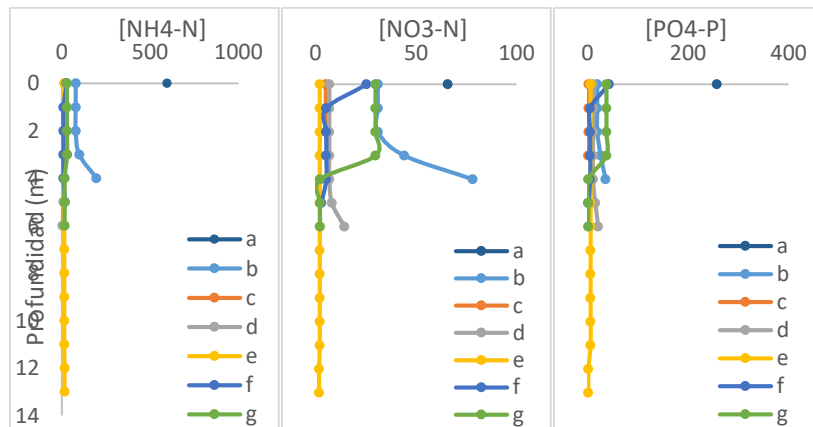


Figura 12. Distribución espacial de los nutrientes en la bahía Jaibal (a), Quiscab (b) y San Francisco (c). Amonio [NH₄-N], Nitratos [NO₃-N] y Fosfatos [PO₄-P]

Análisis de correspondencia canónica (CCA)

El Análisis de Correspondencia Canónica CCA, los primeros tres ejes explican el 35.4 % de la varianza entre la relación de las variables ambientales y biológicas (Figura 13). Se determinó que los Sólidos Totales Disueltos TDS ($r = 1.057$) fue el parametro que ordenó las variables en el eje

1, mientras que el amonio ($r = 0.64$) y la temperatura ($r = 1.23$) los ejes 2 y 3. Asimismo, los resultados sugieren que hay una relación entre los parámetros *in situ* con los puntos de muestreo encontrados en los sitios de bahía Jaibal y las zonas aledañas a la desembocura del río Quiscab. Por otro lado los nutrientes tuvieron una relación con los puntos de muestreo ubicados en las zonas aledañas a la desembocadura del río San Francisco.

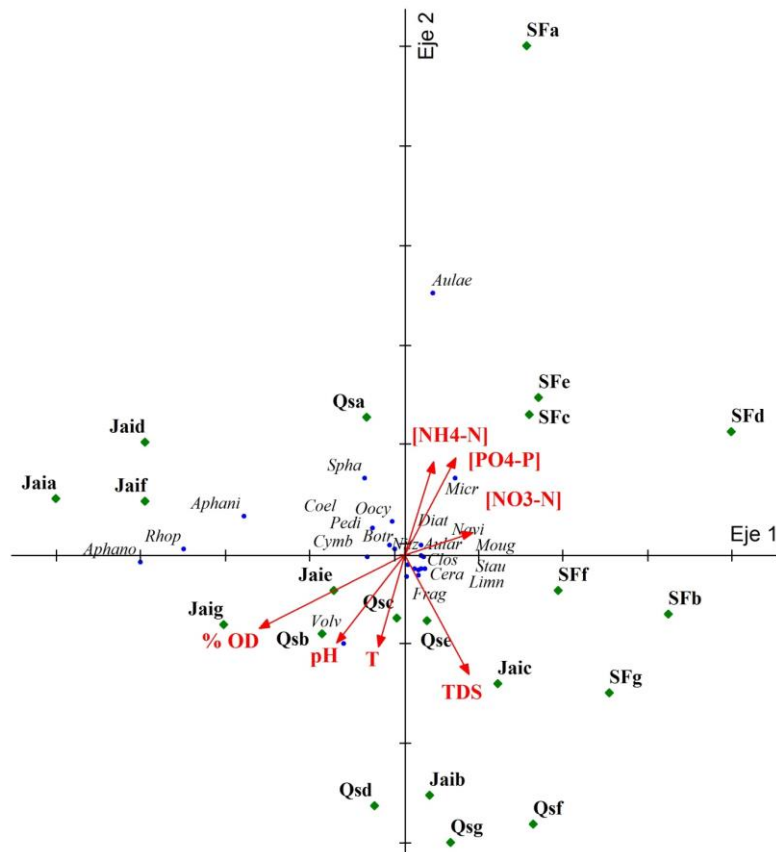


Figura 13. Análisis de correspondencia canónica CCA, Sitios de muestreo: Jaibal (Jai), Quiscab (Qs) y San Francisco (SF); puntos de muestreo en sitios: a,b,c,d,e,f y g; parámetros físico-químicos: saturación de oxígeno (% OD), pH, temperatura (T), sólidos totales disueltos (TDS); géneros de especies: *Aphanizomenon* (Aphani), *Aphanocapsa* (Aphano), *Aulacoseira sp1* (Aular), *Aulacoseira sp2* (Aulae), *Botryococcus* (Botr), *Ceratium* (Cera), *Closterium* (Clos), *Coelastrum* (Coel), *Cymbella* (Cymb), *Diatoma* (Diat), *Fragillaria* (Frag), *Limnoraphis* (Limn), *Microcystis* (Micr), *Mougeotia* (Moug), *Navicula* (Navi), *Nitzschia* (Nitz), *Oocytis* (Oocy), *Pediastrum* (Pedi), *Rhopalodia* (Rhop), *Sphaerocystis* (Spha), *Staurastrum* (Stau) y *Volvox* (Volv)

Análisis de componentes principales (PCA)

El Análisis de Componentes Principales muestra que la varianza entre las variables biológicas puede ser explicada por los tres primeros componentes principales, el eje 1 explica el 61.69% de la varianza. El PCA agrupó los géneros que comparten los tres sitios de muestreo, excluyendo por un lado los géneros *Rhopalodia*, *Aphanocapsa*, *Volvox*, *Aphanizomenon* y *Aulacoseira sp 2* (Figura 14).

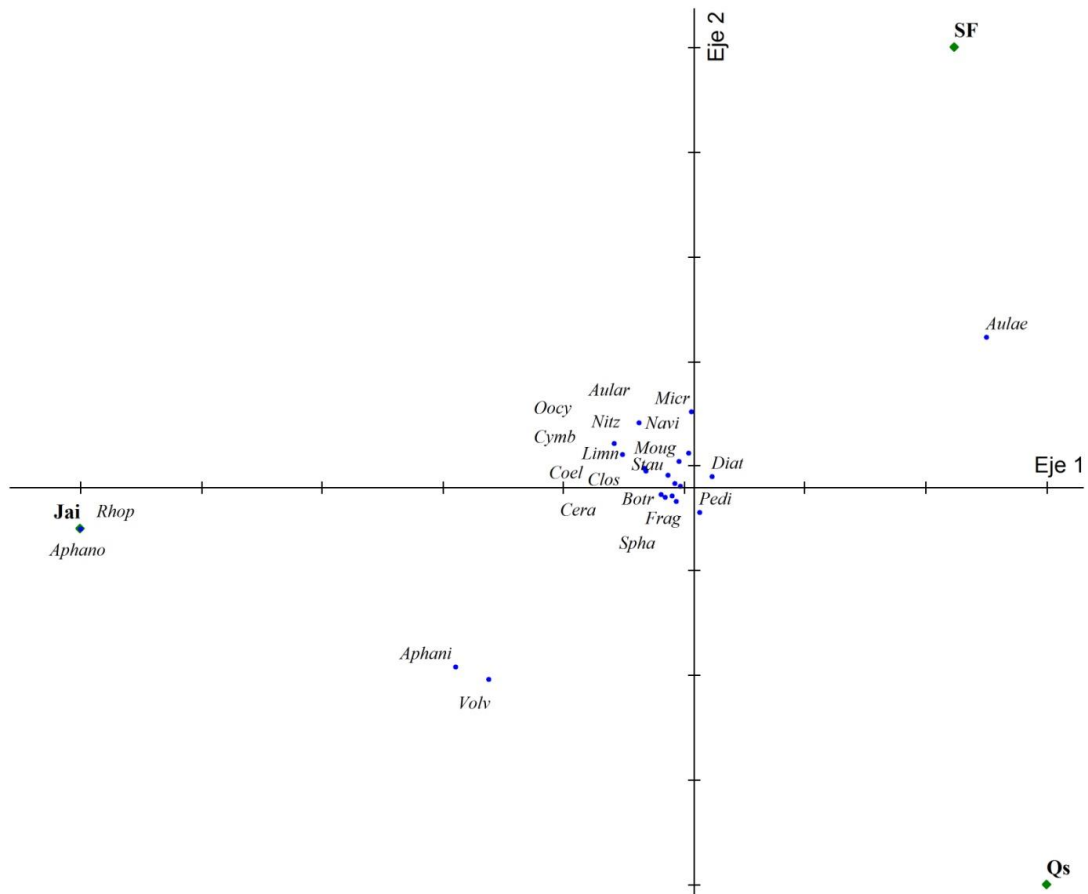


Figura 14. Análisis de Componentes Principales. Sitios de muestreo: Jaibal (Jai), Quiscab (Qs) y San Francisco (SF); géneros de especies: *Aphanizomenon* (Aphani), *Aphanocapsa* (Aphano), *Aulacoseira sp1* (Aular), *Aulacoseira sp2* (Aulae), *Botryococcus* (Botr), *Ceratium* (Cera), *Closterium* (Clos), *Coelastrum* (Coel), *Cymbella* (Cymb), *Diatoma* (Diat), *Fragillaria* (Frag), *Limnorphis* (Limn), *Microcystis* (Micr), *Mougeotia* (Moug), *Navicula* (Navi), *Nitzschia* (Nitz), *Oocytis* (Oocy), *Pediastrum* (Pedi), *Rhopalodia* (Rhop), *Sphaerocystis* (Spha), *Staurastrum* (Stau) y *Volvox* (Volv).

Análisis de similaridad de Jaccard

La similaridad establecida, según el índice de Jaccard, entre los sitios Quiscab y San Francisco es de un 90%. Por otro lado, la similaridad que existe entre los dos sitios antes mencionados y la bahía Jaibal es de un 82% (Figura 15).

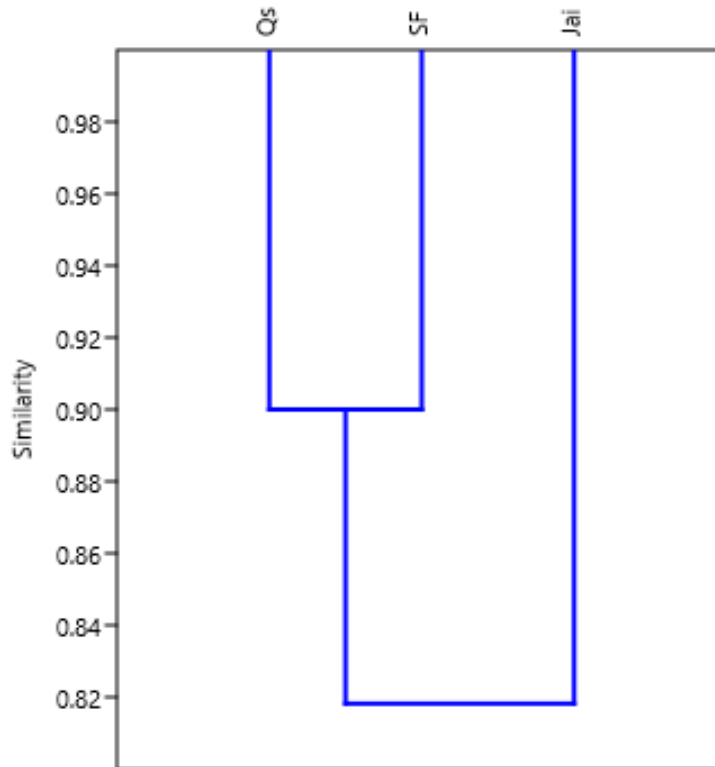


Figura 15. Análisis de similaridad según el índice de Jaccard. Sitios de muestreo: Jaibal (Jai), Quiscab (Qs) y San Francisco (SF)

Discusión de resultados

Riqueza y abundancia

La riqueza y densidad de los géneros de microalgas depende directamente de las condiciones fisicoquímicas y de los nutrientes registrados en el área de estudio. La diferencia de riqueza entre los sitios Quiscab y San Francisco, respecto a la bahía Jaibal puede deberse a la cercanía que ambos sitios tienen al área de influencia de la desembocadura de los ríos, sobre todo que son aguas con altas cargas de contaminantes, debido a actividades antropogénicas. La disminución de la biodiversidad en el fitoplancton puede darse debido al incremento de sólidos totales, turbidez y conductividad en un cuerpo de agua, estos provocados por la contaminación derivada de actividades agrícolas y descarga de aguas residuales sin tratar (Calizaya, et al., 2013). A pesar de las diferencias entre la riqueza de los sitios Quiscab y San Francisco con bahía Jaibal, se debe mencionar que los tres sitios compartían el mismo ensamble fitoplanctónico. La similitud en el ensamble fitoplanctónicas en los tres sitios se debe a que estos se encuentran en el mismo ecosistema y muchos parámetros son similares. La diferencia de los parámetros físicos entre sitios puede generar una leve variación en la estructura de la comunidad y en la dominancia de algunos géneros (Almanza, et al., 2016).

Con respecto a la densidad en el fitoplancton, las condiciones físicas de las zonas aledañas a las desembocaduras de los ríos Quiscab y San Francisco no permiten un crecimiento algal tal como se da en la bahía Jaibal. Esto puede deberse a la constante mezcla de agua entre el río y el lago, además de la presencia de partículas en suspensión, la cual limita la disponibilidad de luz a los organismos (Lewis, 1987; Floder, & Sommer, 1999). Cabe mencionar que los puntos de los sitios de muestreo con menores profundidades y más cercanos a la desembocadura, presentaron una menor densidad de fitoplancton, en comparación a los sitios más alejados a la desembocadura y con mayor profundidad. Esto pudo deberse a un efecto de fotoinhibición en las capas superficiales de los cuerpos de agua, este efecto es causado por la irradiación ultravioleta (UV) la cual limita el crecimiento de las algas, en zonas de poca profundidad, además de que puede haber una limitada disponibilidad de nutrientes. Por otro lado, la mayor eficiencia en la fotosíntesis se registra en profundidades medias, las cuales cuentan con un ambiente lumínico y químico apropiado (Reynolds, 1997; Pinilla, 2006).

A pesar que estadísticamente la diferencia de las densidades registradas en los tres sitios no fue significativa, si existe una diferencia en las densidades, la cual puede atribuirse a las condiciones químicas y físicas presentadas en cada sitio. Estas condiciones se han visto modificadas principalmente en los ríos Quiscab y San Francisco debido a las actividades antropogénicas y la contaminación que se tiene en cada una de estas microcuencas, como lo expone Bocanegra (2013) en su tesis de medición del impacto de estos dos ríos sobre la productividad el fitoplancton. Comparado con su contra parte en donde no existe gran impacto antropogénico bahía Jaibal presento mayores densidades en el fitoplancton, lo cual puede justificarse a la estabilidad que se presenta en este sitio de muestreo.

Los nutrientes tienen un papel importante en la productividad de los ecosistemas. Las sales de nitrógeno (nitratos, nitritos y amonio) y las de fosforo (fosfatos) sirven para que el fitoplancton elabore materia orgánica nueva en presencia de luz (Lanza, & Gómez, 1999). Aunque las concentraciones de nutrientes fueron más elevadas en los puntos cercanos al río San Francisco, debido al aporte de fertilizantes, detergentes, descarga de aguas residuales y procesos de erosión por extracción de piedrín (Rivas, et al., 2009; Bocanegra, 2013); no existen las condiciones adecuadas para el desarrollo de la comunidad fitoplanctónica. El fitoplancton no solamente depende de estos factores, disponibilidad de nutrientes, sino también de las condiciones ambientales, la dinámica de las corrientes y turbulencia del sistema limita la penetración de la luz, la cual se ve limitada por presencia de partículas suspendidas producida por compuestos terrígenos y materia orgánica. El aporte de estos compuestos a su vez causa un cambio sobre otros parámetros físicos, un aumento en contaminantes produce un aumento en la temperatura, provocando esta última que la saturación del oxígeno disminuya. Todos estos cambios en los parámetros fisicoquímicos se ven reflejado en el fitoplancton haciendo que sus procesos de producción se aceleren o se produzca un detenimiento del crecimiento de las densidades de las especies (Mora, et al., 2011; Lanza, & Gómez, 1999).

Los datos registrados en el sitio Quiscab muestran variaciones en los parámetros físicos, se puede explicar que en este sitio existe una mezcla de masas de agua entre el río y el lago. El río Quiscab es de los principales afluentes del lago, la relación entre la entrada de energía al lago y la profundidad, a través de la cual se disipa la energía, tiene una importancia en la dinámica del lago (Catalán, 1987); indicando que el ingreso del agua proveniente del río tiene una influencia

relativamente alta sobre la estabilidad de la columna de agua (Vega, et al., 2005). Este constante intercambio de energía evita una disposición de nutrientes y creando una mayor turbidez afectando la disponibilidad de luz, siendo estos factores claves para la producción del fitoplancton (Santamaría, et al., 1999; de la Peña, 1996).

En bahía Jaibal se puede resaltar que los niveles de clorofila *a* son mayores que en los otros dos sitios estudiados. Los niveles altos de este pigmento se pueden asociar a la productividad (Ramírez, & Altaráz, 2002), hay que recalcar que dicho sitio de muestreo fueron los que presentaron los resultados con mayores densidades con respecto al fitoplancton. Siendo en este sitio un lugar donde las densidades de las clases Bacilariophyceae y Cyanophyceae fueron las mayores.

Otro evento a resaltar en este sitio es la estratificación térmica registrada a un metro de profundidad, estudios realizados han registrado los gradientes máximos de temperatura en profundidades de 0.6 - 1 m, este comportamiento es característico de lagos oligomicticos, en los cuales la temperatura del agua superficial oscila entre 20 y 30° (Benjumea, & Wills, 2007). La estratificación térmica tiene una relación directa con la producción del fitoplancton, las condiciones favorables permiten un incremento en la productividad primaria y el inicio de una estratificación en las capas superficiales, debido a una mayor radiación solar y disposición de luz. Siendo así que la productividad primaria tiene una relación directa con la combinación de ciertos factores determinantes en este caso luz, temperatura y nutrientes (Reyes, et al., 2003).

7. Conclusiones

- Se identificó 24 géneros de microalgas, perteneciendo diez a la clase Bacillariophyceae, dos Charophyceae, siete Chlorophyceae, cuatro Cyanophyceae y un Dinophyceae. El género que presentó la mayor densidad fue *Fragilaria*.
- El sitio muestreado con la mayor diversidad de géneros y densidad de fitoplancton fue bahía Jaibal.
- No se estableció una relación entre las variables ambientales, la densidad y composición del fitoplancton en los sitios de muestreo.
- La composición de la comunidad fitoplanctónica fue similar y con muy poca varianza en los tres sitios de muestreo, esto se debe a que los sitios se encontraban en el mismo ecosistema.
- Las altas cargas de contaminantes, producto de las actividades antropogénicas que se desarrollan dentro de la zona norte de la cuenca del lago Atitlán, provocan un incremento en los sólidos totales, la conductividad, turbidez y disminución del oxígeno disuelto, lo cual tiene un efecto en las comunidades acuáticas.
- La fotoinhibición, la disponibilidad de luz y los sólidos totales disueltos son los factores que podrían estar afectando la densidad del fitoplancton en los sitios evaluados.

8. Recomendaciones

- Ampliar el período de evaluación del estudio, al menos durante un año, con el fin de evaluar los cambios en una escala temporal y ver las diferencias que habría de la temporada seca a la temporada lluviosa.
- Evaluar el impacto que tienen las poblaciones humanas alrededor del lago sobre la comunidad planctónica.
- Establecer una metodología que pueda medir el alcance de la contaminación difusa de las plumas de las desembocaduras de los ríos en el lago Atitlán sobre las comunidades acuática y en la calidad del agua en zonas aledañas.

9. Bibliografía

- Almanza, V., Parra, O., Bicudo, D. M., Carlos, E., González, M. A., Lopez, M., & Urrutia, R. (2016). Floraciones de fitoplancton y variación de la estructura comunitaria fitoplanctónica en tres lagos someros eutróficos de Chile Central. *Gayana Botánica*, 73 (2), 191-205.
- Aranda, N. (2004). *Eutrofización y calidad del agua de una zona costera tropical* (Tesis Doctoral en Ciencias del Mar). España: Universidad de Barcelona.
- Arriola, I., Reyes, F., & Javier, P. (2017). *Procedimiento operacional estandarizado 12, análisis de plancton*. Guatemala: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del lago de Atitlán y su Entorno, y Centro de Estudios Atitlán.
- Barrientos, T., & Benítez, H. (1996). *Arqueología subacuática en la playa sur de lago de Atitlán: Métodos y hallazgos*. Guatemala: Museo Nacional de Arqueología y Etnología.
- Benjumea, C., & Wills, Á. (2007). Evaluación de la estratificación térmica y su relación con el oxígeno disuelto del agua en la ciénaga Cachimbero, municipio de Cimitarra, Santander. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (41), 48-65.
- Bocanegra, K. (2013). *Bioensayo para la medición del efecto de los ríos San Francisco y Quiscab en la productividad primaria en el lago Atitlán, Sololá* (Tesis de Ingeniería Ambiental). Guatemala: Universidad Rafael Landívar [URL].
- Calizaya, J., Avendaño, M., & Delgado, I. (2013). Evaluación de la calidad del agua fluvial con diatomeas (Bacillariophyceae), una experiencia en Tacna, Perú. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 30, 58-63.
- Catalan, J. (1987). Quan el Pirineu esdevé un laboratori: Anàlisi del projecte d'estudi limnològic a l'estany Redó. *Espais Revista del Departament de Política Territorial i Obres Públiques*, 2, 29-33.



- Chalarca, D., Mejía, R., & Aguirre, N. (2007). Aproximación a la determinación del impacto de los vertimientos de las aguas residuales domésticas del municipio de Ayapel, sobre la calidad del agua de la ciénaga. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 40, 41-58.
- De la Peña, G. (1996). Efecto de la turbidez en la productividad primaria en dos estaciones en el área del delta del Río Colorado. *Ciencias Marinas*, 22 (4), 483-493.
- Flöder, S., & Sommer, U. (1999). Diversity in planktonic communities: an experimental test of the intermediate disturbance hypothesis. *Limnology and Oceanography*, 44 (4), 1114-1119.
- Gil, E. (2015). *Informe final Caracterización y evaluación de la calidad del agua de los principales afluentes de la cuenca del lago de Atilán, río Quiscab y río San Francisco*. Guatemala: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología [CONCYT], Secretaria Nacional de Ciencia y Tecnología [SENACYT], Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología [FONACYT], y Universidad de San Carlos de Guatemala.
- González, S. (2007). Contaminación difusa de las aguas. *Revista Tierra Adentro*, 77, 21-25.
- Lanza, G., & Aguirre, S. (1999). Físicoquímica del agua y cosecha de fitoplancton en una laguna costera tropical. *CIENCIA ergo-sum*, 6 (2), 147-153.
- Lewis, M. (1987). Phytoplankton and thermal structure in the tropical ocean. *Oceanológica Acta, Special issue*, 91-95.
- Luján, A. (2000). Las algas, indicadores de la calidad del agua. *Interciencia UNRC Río Cuarto*, 4 (4), 1-4.
- Mora, C., Flores, H., Durán, Á., & Ruíz, J. (2011). Cambio climático y el impacto en la concentración de oxígeno disuelto en el lago de Chapala. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2 (2), 381-394.
- Nannavecchia, P. (2016). *Contaminación antrópica de los cuerpos de agua: Estudio de su efecto sobre organismos del fitoplancton a escala ecológica y de bioensayos de laboratorio* (Doctoral Dissertation). Argentina: Universidad de Buenos Aires, y Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.



- Neyra, P., & Yucra, L. (2017). *Impacto del vertimiento de aguas residuales en las comunidades fitoplanctónicas de la zona marino costera de Ilo-Moquegua* (Tesis de Ingeniería Ambiental). Perú: Universidad Nacional de Moquegua.
- Oliva, B., Pérez, J., del Cid, M., Gaitán, M., Valladares, B., Martínez, F., & Hernández, E. (2010). *Estudio de contaminantes ecotóxicos en agua y organismos acuáticos del lago de Atitlán*. Guatemala: Informe Final DIGI-Facultad de Farmacia-AMSCLAE.
- García, O., Díaz, A., & Reyes, F. (2018). *Procedimiento operacional estandarizado 7, 8 y 9, análisis de Amonio, Nitratos/Nitritos y Fósforo reactivo soluble*. Guatemala: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del lago de Atitlán y su Entorno, y Centro de Estudios Atitlán.
- Pinilla, G. (2006). Evaluación de la eficiencia fotosintética del fitoplancton en un lago amazónico (lago Boa) y en un lago andino (lago Guatavita). *Acta Amazónica*, 36, 221-228.
- Ramalho, R. (1996). *Tratamiento de aguas residuales*. Barcelona, España: Reverté.
- Ramírez, J., & Alcaraz, H. (2002). Dinámica de la producción primaria fitoplanctónica en un sistema eutrófico tropical: Laguna del Parque Norte, Medellín, Colombia. *Caldasia*, 24 (2), 411-423.
- Rejmánková, E., Komárek, J., Dix, M., Komárková, J., & Girón, N. (2011). Cyanobacterial blooms in lake Atitlan, Guatemala. *Limnológica*, 41 (4), 296-302.
- Reyes, A., Cervantes, R., Morales, R., & Valdez, J. (2003). Variabilidad estacional de la productividad primaria y su relación con la estratificación vertical en la Bahía de La Paz, BCS. *Hidrobiológica*, 13 (2), 103-110.
- Reyes, F., Ujpan, D., & Valiente, S. (2018). Batimetría y análisis morfométrico del lago de Atitlán (Guatemala). *Revista Científica*, 27 (1), 48-58.
- Reynolds, C. S. (1997). *Vegetation processes in the pelagic: A model for ecosystem theory*. Germany: Ecology Institute.



- Rivas, Z., Márquez, R., Troncone, F., Sánchez, J., Colina, M., & Hernández, P. (2005). Contribución de principales ríos tributarios a la contaminación y eutrofización del lago de Macaibo. *Ciencia*, 13 (1), 68-77.
- Rivas, Z., Sánchez, J., Troncone, F., Márquez, R., Ledo de Medina, H., Colina, M., & Gutiérrez, E. (2009). Nitrógeno y fósforo totales de los ríos tributarios al sistema lago de Maracaibo, Venezuela. *Interciencia*, 34 (5), 308-314.
- Rodas, E., Vasquez, C., & García, F. (2020). Dinámica del consumo y aporte de nutrientes de fitoplancton, dominado por *Microcystis* sp. (Cyanophyceae) del lago de Amatitlán. *Ciencia, Tecnología y Salud*, 7 (1), 86-93.
- Roldán, G., & Ramírez, J. J. (2008). *Fundamentos de limnología neotropical*. Antioquia: Universidad de Antioquia.
- Santamaría, E., Álvarez, S., Millán, R., & Müller, E. (1999). Sobre el efecto débil de las surgencias de verano en la biomasa fitoplanctónica del Golfo de California. *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat.*, 49, 207-212.
- Silva, C. (2010). Agricultura limpia y la necesidad del uso racional de los fertilizantes. *Idesia (Arica)*, 28 (1), 5-7.
- Sosa, R., Gaxiola, G., Olivos, A., & Silva, L. (2013). Nutrientes inorgánicos y producción del fitoplancton en una laguna costera subtropical de México. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 48 (1), 143-154.
- Tassara, S., & Ortega, B. (2003). Eurepgap y la regulación chilena en el uso de fertilizantes y plaguicidas. *Agronomía y Forestal U*, 19, 20-25.
- Vega, J., De Hoyos, C., Aldasoro, J., De Miguel, J., & Fraile, H. (2005). Nuevos datos morfométricos para el lago de Sanabria. *Limnetica*, 24 (1-2), 115-122.
- Wetzel, R. (2001). *Limnology: Lake and river ecology*. San Diego: Elsevier.



10. Anexo

Anexo 1. Riqueza total de fitoplancton a nivel de género recolectados durante agosto a noviembre 2020, en los sitios bahía Jaibal (Jai), Quiscab (Qs) y San Francisco (SF).

Sitio	Jai			Qs			SF		
	Momento			Momento			Momento		
Género	1	2	3	1	2	3	1	2	3
<i>Aphanizomenon</i>	1	1	1		1				
<i>Aphanothece</i>	1								
<i>Aulacoseira sp2</i>					1	1			1
<i>Aulacoseira sp1</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>Botryococcus</i>	1	1	1		1			1	1
<i>Ceratium</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>Closterium</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>Coelastrum</i>	1	1	1		1			1	1
<i>Cymbella</i>	1	1	1	1	1	1		1	1
<i>Diatoma</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>Fragilaria</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>Limnoraphis</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>Microcystis</i>	1		1	1					1
<i>Mougeotia</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>Navicula</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>Nitzschia</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>Oocystis</i>	1	1	1	1	1		1	1	1
<i>Pediastrum</i>	1	1		1			1	1	
<i>Rhopalodia</i>			1						
<i>Sphaerocystis</i>	1	1	1	1	1		1	1	1
<i>Staurastrum</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>Volvox</i>	1	1	1	1	1				
Total	20	18	19	16	18	12	13	16	17

Anexo 2. Densidades promedio (Org/L) de géneros de fitoplancton en los sitios de muestreo bahía Jaibal (Jai), Quiscab (Qs) y San Francisco (SF).

Géneros	Jai	Qs	SF
<i>Aphanizomenon</i>	58.61272067	12.29901264	
<i>Aphanothece</i>	17.00950869		
<i>Aulacoseira espiral</i>		8.648913085	71.62879934
<i>Aulacoseira recta</i>	4138.499138	132.0992077	4667.439738
<i>Botryococcus</i>	149.0862615	98.71407309	79.08881249
<i>Ceratium</i>	305.6389298	166.324442	122.9238431
<i>Closterium</i>	1076.099224	358.0845119	683.518457
<i>Coelastrum</i>	213.8300995	105.3414775	88.24901103
<i>Cymbella</i>	145.8976253	21.20516657	65.1749365
<i>Diatoma</i>	224.1137251	313.7681362	469.4568156
<i>Fragilaria</i>	4909.103737	2732.988518	3141.487222
<i>Limnoraphis</i>	2934.578358	375.4852829	1005.877044
<i>Microcystis</i>	65.068307	22.22428693	235.3175307
<i>Mougeotia</i>	207.9529107	91.18150474	249.8354202
<i>Navicula</i>	562.5948274	244.6618953	1208.043733
<i>Nitzschia</i>	410.5918624	79.68423177	187.1208218
<i>Oocystis</i>	130.0461728	14.69759147	62.59009038
<i>Pediastrum</i>	29.53592749	42.42204109	22.37036934
<i>Rhopalodia</i>	129.819197		
<i>Sphaerocystis</i>	71.42902338	58.676258	40.70875566
<i>Staurastrum</i>	342.3456213	190.6346201	230.383548
<i>Volvox</i>	75.78726617	22.62572802	
Total	1121.490268	404.7776996	1023.940414