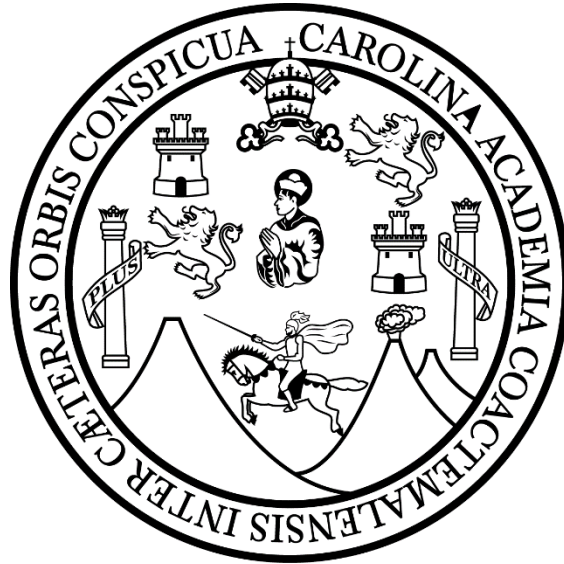


**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA**



**Potencial de las cápsulas cefálicas de los organismos de la Familia Chironomidae (Insecta, Diptera), como bioindicadores de eutrofización cultural en el lago de Amatitlán, Guatemala.**

**Presentado por**  
**Beatriz Alejandra Aguilar Enriquez**  
**Estudiante de la carrera de Biología**

**Guatemala Agosto, 2020**

**Junta Directiva**

M. A. Pablo Ernesto Oliva Soto	Decano
Lcda. Miriam Roxana Marroquín Leiva	Secretaria
Dr. Juan Francisco Pérez Sabino	Vocal I
Dr. Roberto Enrique Flores Arzú	Vocal II
Lic. Carlos Manuel Maldonado Aguilera	Vocal III
Br. Rafael Funes	Vocal IV
Br. Carol Merari Caceros Castañeda	Vocal V

## Agradecimientos

A cada uno de ustedes quienes aportaron a mi crecimiento como investigadora, profesional y persona. Gracias por acompañarme en este camino de la vida. A ustedes, quisiera dedicarles unas palabras:

- Mis padres                      Hector Aguilar y Beatriz de Aguilar, por su apoyo incondicional y por siempre motivarme a ser mejor persona. Porque con su ejemplo me han enseñado que debo luchar por mis metas, que si siembro y trabajo seguro cosechare. Gracias por su cariño incondicional, por su valentía y sentido humor ante cualquier situación. Ustedes le han dado una chispa de la alegría a mi vida.
- Mi hermano.                      Fernando Aguilar, mi hermano favorito, con vos he vivido momentos únicos. Gracias por acompañarme en la aventura de vivir, por tus consejos y por disfrutar la vida conmigo.
- Claudia                      Romero                      Por tu entusiasmo, ese que me motiva a querer transformar Guatemala Oliva.                      a través de la investigación. Por ayudarme a visualizar las cosas que necesito mejorar en diferentes aspectos de mi vida. Por ser una colega, una asesora pero por sobre todo ser una gran amiga. Por ser un ejemplo de científica integral. Por eso y muchas cosas, agradezco tu apoyo.
- Pedrito Pardo                      Por creer en mí, por animarme y apoyarme a seguir adelante. Porque sus comentarios y recomendaciones, me ayudan a crecer tanto como profesional y como persona.
- Matthew Waters, Mark                      Gracias por la ciencia que hacen en nuestro país y por permitirnos Brenner                      y Jason                      estudiar el lago de Amatitlán en conjunto. Por compartir y enseñarnos Curtis, Universidad de                      que juntos podemos aportar al conocimiento actual de los lagos Auburn y Universidad                      tropicales. Gracias por las lecciones compartidas, los artículos y de Florida.                      enseñarnos el arte de coleccionar núcleos de sedimento.
- Liseth Pérez, Julieta                      Gracias por el estudio de la paleolimnología y por compartir su Massafarro                      y su                      conocimiento sobre el uso de los paleobioindicadores. Gracias por incidir en esta ciencia tan interesante, por su aporte al conocimiento de estos grupos en Guatemala, gracias a su motivación seguiremos trabajando en este campo.
- Francis                      Mariel,                      Por nuestras aventuras en la limnología. Porque a pesar de que somos Natalia y las biólogas                      pocas, queremos hacer muchas cosas y sé que vamos hacer cosas que estudian el agua.                      grandes y generar impactos a nivel científico y social en temas del agua. Especialmente a ti Francis Mariel, quien, sin tu apoyo, mi

procesamiento de muestras hubiera tomado una eternidad. Gracias por tu apoyo incondicional y por tener tan buen ojo, eres una gran bióloga.

Jorgito Jiménez. Por tu interés autentico de ayudar y de compartir la visión que tienes de la ciencia y la biología.

Bessy Oliva y el equipo de LIQA. Por ser un gran equipo que trabaja en función de la calidad de agua en nuestro país. Gracias por compartir, por su amabilidad y por hacerme sentir parte del laboratorio.

LENAP, su equipo de trabajo en especial Antonieta Rodas, Carlota Monroy y Emanuel Agreda. Por ser un laboratorio abierto, dispuesto a apoyar a los estudiantes en todo momento. Porque gracias a la plataforma que han creado muchos tesisistas logran hacer investigación y trascender a otras fronteras. Son un ejemplo de trabajo transdisciplinario. Gracias, sobre todo por tener las puertas abiertas siempre y compartir. Son un ejemplo de la escuela de biología.

Departamento de zoología. Al departamento de zoología, quien siempre estuvo pendiente de mis avances y me apoyo en cuanto a permisos para capacitación en diferentes espacios. Por dejarme participar de este genial departamento, en el cual compartimos el conocimiento de la zoología y en especial la de los invertebrados, quienes son un grupo tan amplio y con tanto campo para estudiar en Guatemala. Sigamos perseverando.

## Dedicatoria

A mis padres, que con su esfuerzo y su apoyo incondicional desde el primer momento que decidí estudiar la carrera de biología me apoyaron. Agradezco su esfuerzo y lo valoro, sin ustedes no estaría en el lugar en donde estoy. Los amo y a ustedes, dedico este uno de mis muchos logros por venir en la vida. Se los entrego como fruto de mi esfuerzo y crecimiento como profesional.

A mi hermano, quien desde pequeña me motivo a buscar y explorar más. Los constantes retos y las pláticas de calidad me ayudaron a ser una persona más analítica y crítica ante diferentes situaciones. Gracias por siempre darme un punto de vista diferente.

A mis abuelitos, MAMA MERY y PAPA MAN quienes desde el cielo me acompañan día con día en mis nuevas aventuras. Nunca olvido sus enseñanzas que me guían. Los llevo en mi corazón. A mi abuelita, MAMA CHELITA quien auténticamente se interesa por saber que estudio y que hago con mi carrera universitaria. Gracias por su amor y su apoyo incondicional, doy muchas gracias de poder compartir con ella parte de mi vida, te adoro y te extraño todos los días de mi vida.

A mi familia, tías, tíos, primos y primas, quienes hemos compartido momentos claves de nuestras vidas. Gracias por acompañarnos en nuestros procesos de crecimiento.

A esas personas que puedo llamar amigas a Melany, Ana Fión (la compañera), Juanito y Eliane (la canche); por su amistad incondicional y enseñarme que la amistad es en doble vía, donde ambos compartimos y crecemos en comunidad. Siempre los llevo en mi corazón.

A mis amigos y amigas de la carrera, quienes constantemente nos acompañamos día con día en este proceso de aprendizaje, a quienes nos vemos por los pasillos y con ánimo de apoyarnos hacemos la pregunta: ¿Y cómo va la tesis?, aunque en ese momento la expresión no sea lo mejor, sabemos que es una forma de motivarnos. Gracias por estar pendiente y compartir su conocimiento, sin ustedes la universidad no hubiese sido lo mismo.

A momo, quien sé que es parte de nosotros ahora. Porque compartíamos la pasión por estudiar el agua, siempre será algo que nos va a unir. Y sé que estas allí, en cada libélula que me rodea, gracias por enseñarme que la vida se debe vivir intensamente. Te quiero y te extraño.

A las biólogas que estudian el agua, porque nosotras somos el futuro de la limnología, agentes de cambio que seguirá impulsando la limnología en nuestro país. Porque no tenemos miedo a soñar y lo vamos a convertir en realidad.

Al IIQB y la DIGI, por los fondos que presupuestaron dicha investigación en la Universidad de San Carlos y la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Gracias por velar que la investigación siga creciendo en nuestro país y creer en este tipo de proyectos, que promueven el estudio de la calidad del agua.

A la Escuela de Biología por ser mi centro de estudios, porque dentro de sus dificultades pude forjar mi profesionalismo. Agradezco a grandes personajes como Mario Dary Rivera, quien en su legado, es una gran inspiración para ser mejor bióloga día con día.

Al Movimiento Ecológico Estudiantil y sus integrantes, quienes me han enseñado que todo aprendizaje debe ser aplicado y no podemos quedarnos en la academia. Que debemos trascender a la organización y acción. Los momentos que hemos compartido juntos están en mi corazón para el resto de mi vida.

Por último, a mi país que, con inestabilidades, con sus descuidos, con su caos constante; me ha enseñado que en la adversidad tenemos que seguir para adelante. Que los cambios deben de venir de un análisis profundo de la realidad y que con plena consciencia como ciudadana y científica hago la diferencia.

## Tabla de contenido

Índice de tablas .....	9
1. RESUMEN .....	11
2. INTRODUCCIÓN .....	12
3. ANTECEDENTES .....	15
3.2. Estado trófico actual, lago de Amatitlán .....	17
3.3. Eutrofización cultural-inducida y cambios ambientales .....	17
3.4. Paleolimnología.....	18
3.4.1. Indicadores “No biológicos” .....	18
3.4.1.1. Fósforo inorgánico (F). .....	19
3.4.1.2. Nitrógeno total (NT).....	19
3.4.1.3. Carbono Orgánico (C) .....	20
3.4.1.4. Relación N:F y relación C:N:F.....	20
3.5. Paleoindicadores biológicos.....	20
3.5.1. Familia Chironomidae .....	21
3.5.1.1. Morfología de la larva de Chironomidae .....	22
3.5.1.2. Ecología y hábitat .....	23
4. JUSTIFICACIÓN.....	24
5. OBJETIVOS.....	26
5.1. General.....	26
5.2. Específicos .....	26
6. HIPOTESIS.....	26
7. MATERIALES Y MÉTODOS .....	26
7.1. Materiales.....	26
7.2. Métodos .....	28
7.2.1. Sitio de colecta y colecta de perfiles de sedimentación .....	30
7.2.2. Procesamiento y análisis de muestras no-biológicas .....	31
7.2.2.1. Fósforo inorgánico (F) .....	31
7.2.2.2. Nitrógeno total (NT) .....	32
7.2.2.3. Carbono Orgánico (C) .....	32
7.2.2.4. Relación N:F y relación C:N:F.....	32
7.2.3. Procesamiento de muestras biológicas .....	33

7.2.3.1. Tratamiento, tamizaje y conteo de muestras biológicas .....	33
7.2.3.2. Identificación y montaje de organismos de la familia Chironomidae (Insecta, Diptera).....	33
7.2.3.3. Propuesta de bioindicadores de la familia Chironomidae para la determinación de la calidad del agua.....	34
<b>8. RESULTADOS .....</b>	<b>36</b>
8.1. Variables no biológicas .....	36
8.1.1. Breve descripción de los sedimentos .....	36
8.1.2. Cuantificación de variables biológicas .....	36
8.1.3. Relación entre variable biológica y variables no biológicas ligadas a procesos de eutrofización cultural .....	42
8.1.4. Potenciales bioindicadores de eutrofización cultural .....	51
<b>9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>53</b>
<b>10. CONCLUSIONES .....</b>	<b>75</b>
<b>11. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>78</b>
<b>12. REFERENCIAS.....</b>	<b>80</b>
<b>13. ANEXOS.....</b>	<b>90</b>



## Índice de tablas

Tabla 1 <i>Listado de materiales utilizados por etapa en la presente investigación.</i> .....	27
Tabla 2 <i>Coordenadas de los puntos de muestreo a evaluar durante la presente investigación</i> ....	31
Tabla 3 <i>Características a evaluar en los potenciales bioindicadores de eutrofización cultural en el lago de Amatitlán.</i> .....	34
Tabla 4. <i>Subfamilia, descripción, características taxonómicas y hábitat de los géneros o especies de la familia Chironomidae presentes en los sedimentos del lago de Amatitlán, Guatemala.</i> .....	37
Tabla 5. <i>Valores obtenidos de las relaciones C:N:F (Carbono orgánico [ppm]: Nitrógeno inorgánico total [ppm]: Fósforo inorgánico [ppm]) y relación N:F obtenidos en los dos núcleos de sedimentos obtenidos del lago de Amatitlán.</i> .....	43
Tabla 6 <i>Matriz ponderada de organismos de la familia Chironomidae (Orden: Diptera) como potenciales bioindicadores de eutrofización cultural en núcleos de sedimento del lago de Amatitlán, Guatemala.</i> .....	52

## Índice de figuras

<i>Figura 1</i> Ubicación de los puntos de muestreo del sistema hidrológico Amatitlán. ....	16
<i>Figura 2</i> Fotografía de cabeza de <i>Chironomus sp.</i> obtenido del lago de Amatitlán, Guatemala, Aguilar, A., 2018. ....	22
<i>Figura 3</i> Esquema general de las partes de la cápsula cefálica de los organismos de la familia Chironomidae. ....	23
<i>Figura 4</i> Flujoograma de métodos realizados durante la presente investigación. ....	29
<i>Figura 5</i> Mapa de localización de los sitios de muestreo Oeste y Este en el lago de Amatitlán. ...	30
<i>Figura 6.</i> Esquematación de las concentraciones de las variables biológicas (número de individuos, de géneros y/o especies, de organismos de la familia Chironomidae [Orden: Diptera]), no biológicas (parámetros fisicoquímicos [nutrientes inorgánicos e orgánicos (Carbono orgánico-C [ppm], Nitrógeno Total-NT [ppm], Fósforo inorgánico-F [ppm], relaciones C:N:F y N:F] a lo largo de todo el sedimento obtenido del núcleo oeste del lago de Amatitlán, Guatemala. Las profundidades están presentadas cada 2 cm. ....	39
<i>Figura 7.</i> Esquematación de las concentraciones de variables biológicas (número de individuos de géneros y/o especies de organismos de la familia Chironomidae [Diptera]), no biológicas nutrientes inorgánicos e orgánicos (Carbono orgánico-C [ppm], Nitrógeno Total-NT [ppm], Fósforo inorgánico-F [ppm], relaciones C:N:F y N:F, a lo largo de todo el sedimento obtenido del núcleo este del lago de Amatitlán, Guatemala. ....	40
<i>Figura 8.</i> Análisis de correspondencia sin tendencia (DCA, por sus siglas en inglés) de las especies y/o géneros obtenidos en el núcleo este del lago de Amatitlán, Guatemala. Los círculos representan las diferentes agrupaciones identificadas y las abreviaciones observadas representan a las especies o géneros de quironómidos identificados como: <i>Ablabesmyia</i> , <i>Coelotanypus</i> , <i>Chironomus anthracinus</i> ( <i>C. anthracinus</i> ), <i>Chironomus plumosus</i> ( <i>C. plumosus</i> ), <i>Endotribelos</i> , <i>Goeldichironomus</i> , <i>Glyptotendipes</i> , <i>Labrundinia</i> y <i>Polypedilum</i> . ....	42

<i>Figura 9</i> Análisis de Componentes Principales de las variables no biológicas cuantificadas en los sedimentos del núcleo oeste del lago de Amatitlán, Guatemala. Se representan los siguientes valores: C, NT, F, relación N:F, y la relación C:N:F. ....	45
<i>Figura 10</i> Relación lineal entre el eje de ordenación de variables no biológicas obtenida del análisis de componentes principales (PCA) y la abundancia de <i>C. anthracinus</i> en el núcleo oeste. ....	46
<i>Figura 11</i> Relación lineal entre el eje de ordenación de variables no biológicas, obtenida del análisis de componentes principales y la abundancia de <i>Goeldichironomus</i> en el núcleo oeste. ...	47
<i>Figura 12</i> Análisis de Correspondencia Canónica (ACC) resultado de las abundancias y riqueza de los organismos de la familia Chironomidae y las variables no biológicas (carbono orgánico (C), nitrógeno total (NT), fósforo inorgánico (F), relación nitrógeno total y fósforo inorgánico (N:F), y la relación carbono orgánico, nitrógeno total y fósforo inorgánico (C:N:F)), analizadas en los sedimentos del núcleo oeste del lago de Amatitlán, Guatemala. ....	47
<i>Figura 13</i> Análisis de componentes principales (ACP) de las variables no biológicas cuantificadas en los sedimentos del núcleo este del lago de Amatitlán, Guatemala. Se representan los siguientes valores, de la siguiente manera: carbono orgánico (C), nitrógeno total (NT), fósforo inorgánico (F), relación nitrógeno total y fósforo inorgánico (N:F), y la relación carbono orgánico, nitrógeno total y fósforo inorgánico (C:N:F). ....	49
<i>Figura 14</i> Análisis de relación lineal entre los ejes de ordenación de la variable biológica obtenida entre los análisis DCA y ACP para las variables no biológicas. ....	50
<i>Figura 15</i> Análisis de Correspondencia Canónica (ACC) resultado de las abundancias y la riqueza de los organismos de la familia Chironomidae y las variables no biológicas C, NT, F, N:F, y C:N:F, analizadas en los sedimentos del núcleo este del lago de Amatitlán, Guatemala. ...	51

## Índice de Anexos

<b>Anexo 1</b> .....	90
<b>Anexo 2</b> .....	91

## 1. RESUMEN

La eutrofización cultural de ecosistemas lacustres puede ser evaluada por indicadores no biológicos y bioindicadores. A su vez, pocos estudios paleolimnológicos en el neotrópico describen los efectos de la eutrofización cultural en las comunidades biológicas del pasado. El lago de Amatitlán en Guatemala, reportado como eutrófico desde 1950, fue estudiado para conocer si sus procesos de eutrofización cultural podrían ser evidenciados. A través del uso de la relación entre indicadores no biológicos y bioindicadores en sedimentos del lago, los cuales fueron extraídos usando un nucleador de pistón simple en la parte oeste (O) y este (E), los cuales fueron subdivididos cada 2 cm. Posteriormente, se cuantificaron concentraciones de nutrientes carbono orgánico (C), nitrógeno total (NT), fósforo inorgánico (F), así como las relaciones N:F y C:N:F; como indicadores no biológicos. Los organismos de la familia Chironomidae fueron identificados y cuantificados, y luego ponderados para evaluar su potencial como bioindicadores de la eutrofización cultural. Los resultados mostraron diferencias entre la parte O y E; evidenciando para el O una mayor concentración de nutrientes de C (10 cm; máx. 4.1 ppm), F y NT (4 cm; máx. 0.08 y 0.62 ppm; respectivamente). Similares concentraciones para el lado E, C (6 cm; máx. 3.68 ppm) así como las de F (0 cm; máx. 0.11 ppm) y NT (0 cm; máx. 0.96 ppm). Las relaciones N:F, presentaron valores mayores para E (8.5 máx.) que O (6.9 máx.). En paralelo, se observó una mayor abundancia y diversidad de los organismos de la familia Chironomidae en E (423 individuos y 9 géneros) en relación a O (20 individuos y 3 géneros). Según el DCA, se clasificaron los organismos de la familia Chironomidae en tres grupos: Grupo 1, compuesto por *C. anthracinus*, *C. plumosus*, *Goeldichironmus* y *Polypedilum*, (tolerantes a las concentraciones de nutrientes), Grupo 2, compuesto de *Cladopelma* y *Ablabesmyia* (sensibles a los cambios ambientales) y el Grupo 3, sin una agrupación evidente: *Coelotanypus*, *Endotribelos*, *Glyptotendipes*, Morfo juvenil y *Labrundinia*. Los grandes hallazgos de la presente investigación consisten en reportar que los géneros *Ablabesmyia* y *Labrundinia* (subfamilia Tanypodinae); y el género *Goeldichironomus* y las especies *C. anthracinus* y *C. plumosus* (subfamilia Chironominae), presentan potencial de ser bioindicadores de los procesos de eutrofización cultural del lago de Amatitlán

## 2. INTRODUCCIÓN

"Los sedimentos en los lagos son archivos valiosos del cambio ambiental pasado" (Smol, 1992, p.49). La paleolimnología, como ciencia y herramienta efectiva, permite reconstruir los cambios que ocurren a lo largo del tiempo en el sedimento (es decir, cambio climático, cambios en las comunidades terrestres, impacto humano, etc.) integrando propiedades físicas, químicas y biológicas (Saulnier-Talbot, 2016; Smol, 1992). Actualmente hay diversos estudios cuantificando los cambios de los cuerpos de agua, varios se enfocan en cuantificar el impacto de la eutrofización de lagos (Ekdahl et al., 2004; Little y Smol, 2000; Reavie, Neill, Little, y Smol, 2006; Velez, Curtis, Brenner, Escobar, Leyden y Popenoe de Hatch, 2011).

En lagos, la eutrofización es un proceso relacionado con la productividad primaria (Williamson, Dodds, Kratz y Palmer, 2008), la cual puede ser natural o cultural (Liu, Zhang y Liu, 2010, p.289). La eutrofización cultural se produce por una sobrecarga de nutrientes (i.e. nitrógeno y fósforo) a través de la escorrentía de aguas residuales, actividades agrícolas o cualquier perturbación del ecosistema inducida por el humano (Saulnier-Talbot, 2016; Stoermer, y Smol, 2001). El lago de Amatitlán en Guatemala es un ejemplo de un lago eutrófico. Es el cuarto lago más grande de Guatemala, se encuentra al sureste de la ciudad de Guatemala y recibe la carga del río Villalobos, con alta concentración de nutrientes, desechos industriales y sólidos (División de control calidad ambiental y manejo de lagos, 2015). El lago se ha vinculado con mala calidad de agua debido a procesos como la eutrofización natural y la cultural, erosión, aguas residuales y florecimientos algales tóxicos (Ellenberg, 2014; Romero-Oliva, Contardo-Jara, Block, y Pflugmacher, 2014). Según el estudio de Velez et al., (2011) realizado con polen y diatomeas, los procesos de deforestación y erosión, son evidenciados en las áreas aledañas al lago en presencia de la cultura maya, permitiendo reconstruir históricamente el pasado del lago hasta el Holoceno tardío (250 B.C.) Se reporta un estado hipereutrófico del lago de Amatitlán desde el año 1950 (Brezonik y Fox, 1974, Pérez, Massaferró, y Correa-Metrio, 2017). Sin embargo, en la actualidad no existen estudios determinando las variaciones en la biota del lago, su temporalidad y la relación que han tenido en el estado trófico reciente o en los últimos 100 años.

Entre otros bioindicadores del estado trófico de los cuerpos de agua, se encuentran los quironómidos, diatomeas y microcrustáceos (Pérez et al., 2013). De los anteriores, los

quironómidos presentan características que los sitúan como bioindicadores acuáticos funcionales para estudios paleolimnológicos, debido a su fácil colecta, alta abundancia, riqueza y amplia ubicuidad (Laprida, Massaferró, Mercáu y Cusminsky, 2014). Su característica más destacada es la capacidad de preservar caracteres taxonómicos en sus cápsulas cefálicas, es decir que dichos organismos pueden ser identificados (hasta morfogénero o morfoespecie) a lo largo del tiempo (Massaferró, 2009). En conjunto con los indicadores biológicos, los no biológicos permiten conocer el estado en un tiempo y condición específica de un ecosistema, dichos estudios son conocidos como estudios multiproxies; lo anterior permite, entonces, reconstruir los diferentes eventos de eutrofización, entre otros (Pérez et al., 2017).

Para el neotrópico son pocos los estudios existentes, la mayoría corresponden a los lagos de tierras bajas (Pérez, et al., 2011; Pérez, Bugja, et al., 2010; Pérez, Lorenschat, Brenner, Scharf, y Schwalb, 2010). Pérez y colaboradores (2013) describen de manera general algunos de los lagos del neotrópico de tierras altas, como lo son Atitlán, Amatitlán, Ayarza. Sin embargo, para Guatemala existe solamente un estudio que ha evaluado la eutrofización cultural en el pasado reciente, específicamente en el lago de Izabal, reportando incremento de nutrientes en el año 1950 (Obrist, Brenner, Curtis, Keneey y Salvinelli, 2019), utilizando únicamente parámetros no biológicos, dejando de lado los bioindicadores.

De manera que la finalidad de este estudio fue utilizar a quironómidos como bioindicadores de eutrofización cultural en el pasado reciente (100 años aprox. de sedimentación), combinado con indicadores no biológicos, como el carbono orgánico (C), nitrógeno total (NT) y fósforo inorgánico (F) del lago de Amatitlán (Binford, Brenner, Whitmore, Higuera-Gundy, Deevey, y Leyden, 1987; Massaferró, Guevara, Ribeiro, y Arribére, 2005). Esto por medio de la extracción de dos perfiles de sedimento, el primero en el lado este y el segundo en el lado oeste del lago de Amatitlán, cada núcleo de un total de 84 cm (oeste) y 78 cm (este). En cada sección de sedimento se separaron e identificaron taxonómicamente los organismos de la familia Chironomidae (cápsulas cefálicas) y se cuantificaron los valores de C, NT y F. Con el objetivo de establecer la relación de los procesos de eutrofización cultural, indicados por las concentraciones de nutrientes, con la presencia de individuos de la familia Chironomidae, se diseñó una herramienta de potenciales bioindicadores, basada en la evaluación de características cualitativas de individuos de la familia Chironomidae. Dicha herramienta evidenció que los organismos: *Chironomus anthracinus* (*C. anthracinus*),

*Chironomus plumosus* (*C. plumosus*), *Labrundinia*, *Goeldichironomus*, presentan una potencial bioindicación.

Esta investigación representa un aporte al conocimiento de las especies y géneros conocidos de la familia Chironomidae en el lago de Amatitlán, como una propuesta para que pueda ser implementada en monitoreos neo y paleolimnológicos, ya que dichos organismos generalmente son abundantes en las colectas. Al profundizar en los grupos taxonómicos de los organismos de la familia Chironomidae en el lago de Amatitlán, proveemos de una herramienta útil de monitoreo de la calidad de agua.

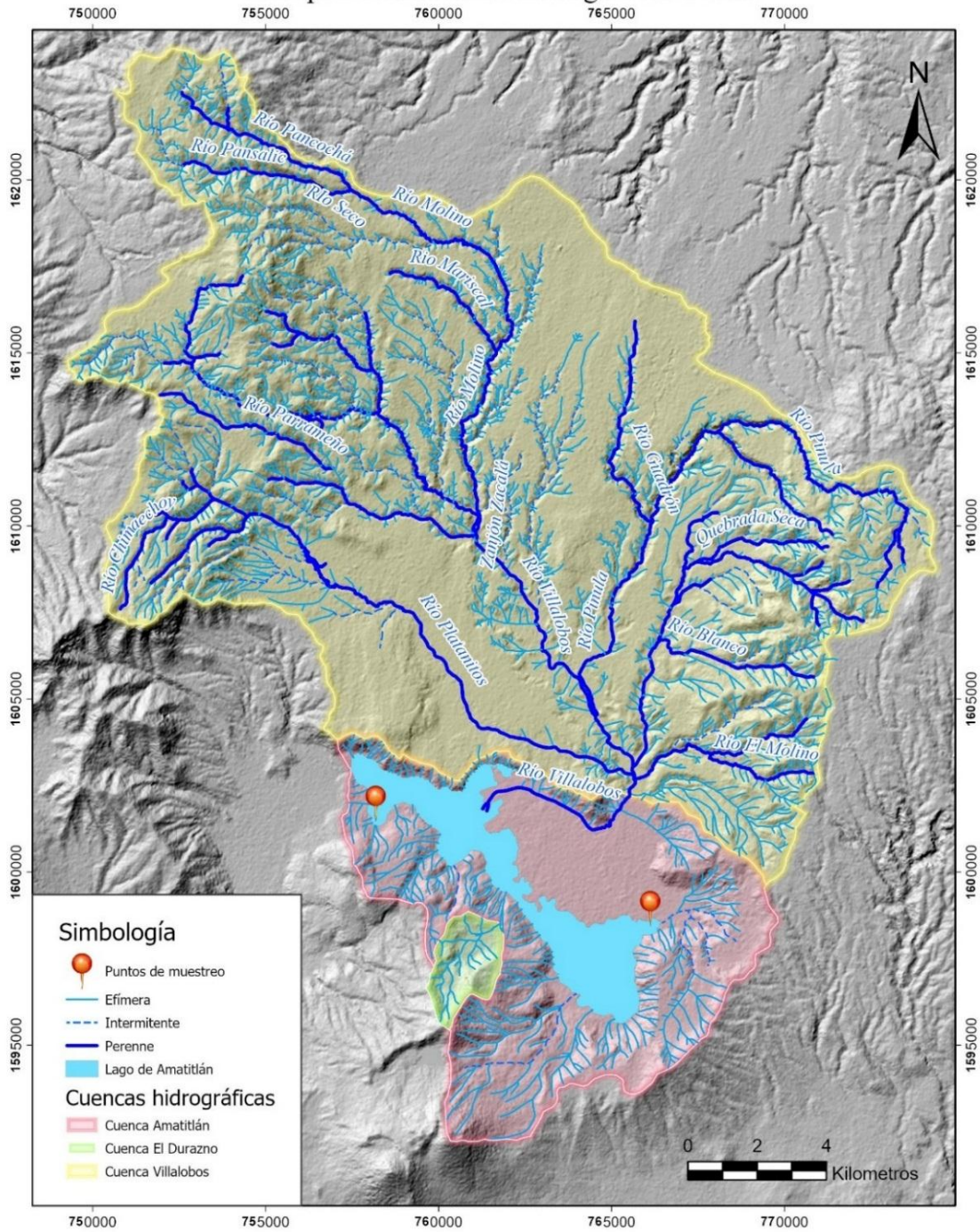
Para futuras investigaciones, se recomienda un conjunto de datos de mayor tamaño, especialmente de aquellas zonas en las que se conocen florecimientos de cianobacterias, abundante vegetación acuática, o ingreso de contaminantes. Esto con el fin de seguir explorando las distribuciones y ecología de los organismos de la familia Chironomidae. La presente investigación proporciona observaciones preliminares que pueden utilizarse para monitorear en el presente y en el futuro; y predecir el impacto de la eutrofización cultural y sus posibles estrategias de restauración en el lago de Amatitlán.

### **3. ANTECEDENTES**

#### **3.1. Cuenca del lago de Amatitlán**

El lago de Amatitlán (ubicado geográficamente en las coordenadas 14°27'23"N, 90°33'58"O) se encuentra a 1186 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), a 25 km al sureste de la ciudad de Guatemala (Figura 1). La cuenca del lago de Amatitlán tiene un origen volcánico y se encuentra rodeada de cuatro volcanes: Agua (3760 m s.n.m.), Acatenango (3976 m.s.n.m.), Fuego (3766 m s.n.m.) y Pacaya (2544 m.s.n.m.) (Autoridad de Manejo Sustentable Amatitlán [AMSA], 2015). La actividad volcánica propia de la cuenca del lago contribuye a la formación de los suelos fértiles en el área (Velez et al., 2011). La cuenca cubre una extensión de 381 km<sup>2</sup> y abarca los municipios de Mixco, Villa Nueva, San Miguel Petapa, Villa Canales, Amatitlán, Santa Catarina Pínula, San José Pínula y San Lucas Sacatepéquez; el total de habitantes aproximado es de 3,257,616 habitantes según estadísticas del 2013 (INE, 2018; Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales [MARN], 2017; Calderon, Trowbridge y Vanucchi, 2010). El río Villalobos constituye el principal afluente y cuenta con tributarios como: el río Platanitos, Pínula, Las Minas, Tulujá, El Bosque, Molino, San Lucas y Parrameño. El río Michatoya es el primer río efluente, y es tributario de la cuenca del río María Linda, el cual desemboca finalmente en el Océano Pacífico (División de control calidad ambiental y manejo de lagos, 2015).

## Jerarquía del sistema hidrológico Amatitlán



Referencia: Topografía base: SRTM (Shuttle Radar Topography Mission); Mapa base: Hojas Cartográficas IGN Amatitlán, Nueva Santa Rosa, Ciudad Guatemala y San José Pinula.; Datum: WGS 1984, Proyección: Zona 15 P; Autor: Ing. Geól. Francis E. Salguero Diaz; Fecha de elaboración: Octubre de 2019.

Fuente: Francis Salguero, edición 2019.

*Figura 1* Ubicación de los puntos de muestreo del sistema hidrológico Amatitlán.



### **3.2. Estado trófico actual, lago de Amatitlán**

El alto índice de contaminación del lago de Amatitlán se debe a varios factores tales como actividades industriales, municipales, aspectos demográficos, sociales, agricultura y urbanización, entre otros (AMSA, 2015; Pérez et al., 2011). El lago es considerado hipereutrófico desde el año 1950 (Pérez et al., 2010). En la actualidad recibe una alta concentración de nutrientes orgánicos como fósforo (540 g/L) y nitrógeno (165 mg/L) provenientes del río Villalobos. Estos tributarios ingresan un volumen total de 437.5 millones de litros de agua contaminada (conjunto de aguas industriales y domésticas) (AMSA, 2015).

Hasta hoy se ha documentado la eutrofización en el lago por medio de la cuantificación de diferentes especies indicadoras. La presencia de diferentes especies de cianobacteria, por ejemplo, *Microcystis aeruginosa* (especie indicadora de contaminación orgánica y productora de cianotoxinas), permite reconstruir los cambios y/o el estado trófico del lago de Amatitlán (AMSA, 2015, Romero-Oliva et al., 2014). Según el informe entregado en el 2015 por la División de control Ambiental y manejo de lagos, desde la perspectiva microbiológica, explican la presencia de coliformes fecales en el lago obtenidos en septiembre del 2015, determinando la existencia concentraciones de hasta  $240 \times 10^4$  unidades formadoras de colonias (UFC)/mL en el río Villalobos, 220 UFC/mL en el lado oeste y  $2 \times 10$  UFC/mL en el lado este (AMSA, 2015). Lo anterior indicando también altos índices de contaminación orgánica.

### **3.3. Eutrofización cultural-inducida y cambios ambientales**

Históricamente el lago de Amatitlán ha registrado cambios en su estado trófico, cambiando de eutrófico hacia hipereutrófico por razones culturales y/o antropogénicos (AMSA, 2015). En el estudio de Vélez y colegas (2011), el cual consistió en una paleo-reconstrucción utilizando polen, se determinó la ocurrencia de deforestación, erosión del suelo, ocupación de tierras altas por parte de los mayas durante los periodos: Pre-clásico medio (625 B.C.~250 B.C.), Clásico temprano (A.D. 125~A.D. 875) y Post-clásico tardío (A.D. 1375~A.D. 1875). Seguidamente, durante el Pre-clásico tardío (250 B.C.~A.D. 125), Clásico tardío y Post-clásico temprano (A.D. 875~A.D. 1375) se observó cambios en la composición del polen en el lago, los cuales son reconocidos como indicadores del abandono de estas tierras y consecuente estabilización del suelo, lo que conllevó a la regeneración natural.

Según Brezonik y Fox, (1974), el año 1950 ha sido un punto de partida en el proceso de eutrofización del lago, reportando cambios en el pH de 7.7 a 9.3 durante el período de 1969 hasta 2008; respectivamente (Brezonik y Fox, 1974). En el 2014 y 2015, se reportaron valores de pH de hasta 9.1 en el centro este del lago (Amsa, 2015). Adicionalmente, se han documentado florecimientos algales recurrentes, debido al ingreso de altas cargas de nutrientes, relacionadas con el rápido consumo de oxígeno durante la fotosíntesis (Pérez et al., 2011), lo anterior estimulado por las altas temperaturas reportadas (Calderon, Trowbridge, y Vanucchi, 2010).

### **3.4. Paleolimnología**

La paleolimnología es una ciencia multidisciplinaria que utiliza la información física, química y biológica preservada en los perfiles de sedimento para la reconstrucción histórica de las condiciones ambientales de un ecosistema acuático con confiabilidad y consistencia (Oldfield, 2005; Smol, 1992). En los estudios paleolimnológicos se utilizan diferentes proxy, definidos como los componentes de un archivo histórico ambiental que pueden ser extraídos, identificados y cuantificados (Pérez et al., 2017). Este tipo de estudios deben incluir una visión multidisciplinaria, integrando diversos proxies, tanto biológicos como físicos o químicos (no biológicos), conocidos ampliamente como estudios multiproxies (Pérez et al., 2017). Las investigaciones con este enfoque son de gran importancia, pues aportan estudios que documentan las respuestas bióticas de los lagos ante cambios ambientales (Birks y Birks, 2006). Adicionalmente, los estudios paleolimnológicos paralelos a la datación tienen un gran potencial en programas de monitoreo ambiental de lagos, pues permiten entender las dinámicas bióticas y tróficas pasadas (Pérez et al., 2017; Smol, 1992).

#### **3.4.1. Indicadores “No biológicos”**

Existen factores que afectan la composición de los sedimentos en gran escala, por ejemplo, “el área de origen, composición, intensidad de la precipitación química, clasificación hidráulica, adsorción, y otros” (Roy, Caballero, Lozano y Smykatz-Kloss, 2008). Estos factores se ven influenciados por las escalas temporales y espaciales, las que a su vez influyen en los patrones de partículas, contaminantes y disponibilidad de contaminantes para los organismos en los ecosistemas (Schwarzenbach, Gschwend y Imboden, 2016). De manera que las actividades humanas quedan registradas mediante factores abióticos, que indican condiciones ambientales pasadas (Hollert et al., 2018). Algunos de los indicadores “no biológicos” relacionados con la eutrofización cultural se describen a continuación.

#### **3.4.1.1. Fósforo inorgánico (F).**

El fósforo total es la suma de todos los componentes de fósforo naturales, en su forma particular y soluble ( $\text{H}_n\text{PO}_4^{n3}$ ,  $\text{H}_4\text{P}_2\text{O}_7$ ,  $\text{P}_3\text{O}_{10}^{5-}$ ,  $\text{HP}_3\text{O}_9^{2-}$ ) (Howell, 2010, p.113). El fósforo en sus diferentes formas, en especial de forma libre, produce un incremento en el crecimiento de las algas, ya que es un elemento esencial y limitante para el crecimiento de plantas y organismos, por lo tanto, promueve la eutrofización en los cuerpos de agua (Ellenberg, 2014; Oliva, 2001). La forma más significativa de fosforo inorgánico en el sistema es el ortofosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) (Wetzel, 2001).

Los bajos niveles de oxígeno, condiciones anóxicas, favorecen la liberación de fósforo del sedimento en el agua que lo cubre. Cuando la materia orgánica se acumula en el sedimento, este puede actuar como un sumidero de fósforo y nitrógeno (Ellenberg, 2014). El estudio del fósforo en sedimentos lacustres permite caracterizar el estado trófico del mismo (Peters, 1986, p.1145); siendo las altas concentraciones de este, la causa más común de la eutrofización en ecosistemas acuáticos (Kopáček, Hejzlar, Kana, Norton y Stuchlík, 2015). Asimismo, “el cambio en concentraciones de fosforo permite conocer las variaciones espaciales y temporales en los procesos sedimentarios de los lagos” (Loizeau, Span, Coppee y Dominik, 2001, p. 208). Por su parte, altas concentraciones de fósforo retenido en los suelos lacustres son consecuencia de la acidificación y pedogénesis (formación de suelo) a largo plazo (Norton, Perry, Saros, Jacobson, Fernandez, Kopáček, Wilson y San Clements, 2011). El fósforo inorgánico será representado como F en la actual investigación.

#### **3.4.1.2. Nitrógeno total (NT).**

El nitrógeno total es la suma de todos los componentes de nitrógeno naturales en su forma particular y soluble ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) (Howell, 2010). Cuando la materia orgánica se acumula en el sedimento, este puede actuar como un sumidero de fósforo y nitrógeno. El estudio del nitrógeno en sedimentos permite caracterizar el estado trófico en los lagos (Fenn et al., 2003). Un depósito de nitrógeno causa la acidificación de los lagos, lo cual repercute directamente en los procesos tanto biológicos como no biológicos en el medio acuático (Gasiorowski y Sienkiewicz, 2013; Lepori y Keck, 2012).

El incremento de nitrógeno en estudios limnológicos ha demostrado tener asociación con la eutrofización, disminución de la claridad del agua y cambios en la composición de especies (Fenn et al., 2003; Spaulding, Otu, Wolfe, y Baron, 2015). El nitrógeno orgánico en su ciclo natural puede convertirse en amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), por medio de las bacterias saprofitas, siendo entonces una fuente

energética para bacterias autótrofas (nitrificantes) que lo transforman en iones nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) y nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), el cual es perjudicial para la salud humana, específicamente de niños menores de seis años de edad (Oliva, 2011). En ambientes naturales las concentraciones de nitratos son normalmente bajas, sin embargo, han aumentado en los diferentes ecosistemas, debido a actividades agrícolas vinculadas al uso de fertilizantes (OMS, 2006). El nitrógeno total será representado como NT, en la actual investigación.

#### **3.4.1.3. Carbono Orgánico (C)**

El carbono que se encuentra en los ecosistemas acuáticos está dividido en dos grupos: carbono orgánico disuelto (COD) y particular orgánicas de carbono (POC). Los detritos de COD y POC, generalmente son utilizadas para representar la cantidad de carbono orgánico presente como organismos vivos en diferentes formas, como bacterias, plancton, flora y fauna, que luego de morir, el material en descomposición se deposita en los fondos de lagos (Wetzel, 2001). El carbono orgánico será representado como C en la actual investigación.

#### **3.4.1.4. Relación N:F y relación C:N:F**

El contenido de carbono orgánico en la materia orgánica es en promedio por lo menos una magnitud mayor que la del nitrógeno. La compleja mezcla de los compuestos orgánicos en fase disuelta y de partículas son descompuestas y mineralizadas a carbono inorgánico, principalmente como dióxido de carbono, y hacia compuestos de nitrógeno inorgánico (Wetzel, 2001). La relación N:F será representada como la relación N:F y la relación C:N:F será representada como la relación C:N:F, a lo largo de la investigación.

### **3.5. Paleoindicadores biológicos**

Los registros fósiles de los sedimentos lacustres son de gran importancia para evaluar los cambios ambientales relacionados a eventos naturales, como erupciones, inundaciones, incendios forestales y actividades humanas (Laprida et al., 2014). Usualmente, estos organismos presentan características que los catalogan como buenos paleoindicadores debido a que: (a) se preservan bien en los sedimentos y pueden ser identificados hasta morfogénero y a veces a morfoespecie; (b) son abundantes, (c) son altamente sensibles a los cambios ambientales; (d) poseen ciclos de vida y comunidades que responden rápidamente a los cambios ambientales (Pérez et al., 2013, p.602).

Para el estudio de paleoindicadores biológicos existen diferentes proxies, tal como las diatomeas (Filo Chromista) y ostrácodos (Clase Ostracoda); los cuales son buenos indicadores de profundidad, temperatura, turbulencia, salinidad, conductividad, pH, oxígeno disuelto y nutrientes (Round, Crawford, Mann, 1990; Pérez et al., 2017; Ruggiero et al., 2015). Los quironómidos presentan características que los clasifican como buenos paleoindicadores de la temperatura y el estado eutrófico de lagos. Cambios en abundancia o composición de especies permiten identificar procesos tales como la eutrofización.

### 3.5.1. Familia Chironomidae

La familia Chironomidae pertenece al Filo Arthropoda, orden Diptera y suborden Nematocera. Estos individuos cuentan con diferentes estadios dentro de su ciclo de vida. Debido a que cambian de estadio de huevo, larva, pupa y adulto, son denominados holometábolos. Estos organismos en estado adulto son comúnmente llamados "moscas no mordedoras" o mosquitos ciegos, mientras que en su estado larval son llamados "gusanos de sangre" (Epler, 2001, p.1). Los adultos presentan el estadio de vida más corto y tienen la capacidad de volar. El rol de los adultos es reproductivo. Las larvas pasan por 4 estadios (I, II, III, IV) y de la larva IV se desarrolla una pupa que migra a la superficie donde emerge el adulto. Una vez que emerge el adulto, queda la cápsula blanda vacía de la pupa, llamada "exuvia" (Pérez et al., 2017, p.167)

Geográficamente, los quironómidos son los insectos holometábolos más distribuidos en todo el planeta. Estos organismos han sido utilizados como indicadores de procesos de eutrofización, en particular para interpretar las condiciones de baja oxigenación disuelta en el hipolimnio (Oxígeno Disuelto [OD] <0.6 mg/L) (Alba, Pardo, Prat, y Pujante, 2005; Armitage, Cranston, y Pinder, 1995). En comparación con otros insectos, los quironómidos están bien representados en los sedimentos acuáticos (Armitage et al., 1995). En el caso específico de eutrofización de los lagos, los quironómidos se encuentran bien representados con la mayor abundancia de la especie *Chironomus spp.* (Warwick, 1980), y específicamente en extrema eutrofización se ha documentado la pérdida de las especies *Chironomus anthracinus* (*C. anthracinus*) y *Chironomus plumosus* (*C. plumosus*) de ambientes (Armitage et al., 1995).

Los quironómidos son un proxy biológico ampliamente utilizado como indicador de condiciones ambientales pasadas, que al combinarla con indicadores no biológicos, constituyen una herramienta importante y decisiva para las inferencias climáticas. En la región Neotropical los estudios que

utilizan a los quironómidos para la reconstrucción ambiental han aumentado de manera exponencial. Sin embargo, aún hacen falta trabajos que profundicen en temas sobre sistemática, taxonomía y ecología (Pérez et al., 2017).

### 3.5.1.1. Morfología de la larva de Chironomidae

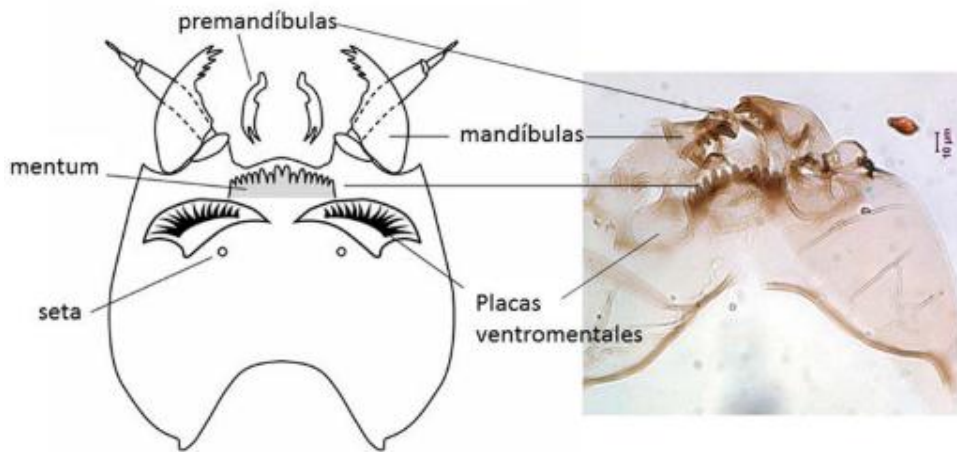
Debido a su ciclo de vida, los estadios larvarios son los mayormente representados, ya que representan el mayor porcentaje de su tiempo de vida (Armitage et al., 1995). Las larvas de quironómidos pueden medir entre 0.5 y 10 mm. Su cuerpo consta de dos partes bien diferenciadas: una cabeza muy desarrollada con dientes, mandíbulas y antenas (Figura 2); y un cuerpo segmentado con pro-patas y cercos en los segmentos posterior y anterior. Las cápsulas cefálicas, de su estado larvario, presentan características taxonómicas que permiten utilizarlas para su identificación en sedimentos, esto debido a que son fuertemente quitinizadas y prevalecen en el sustrato lacustre (Armitage et al., 1995; Epler, 2001). Para fines prácticos, a partir de ahora en la presente investigación, se nombrará organismos a las cápsulas cefálicas.



Referencia: Imagen tomada con un microscopio en un objetivo 100x

*Figura 2* Fotografía de cabeza de *Chironomus sp.* obtenido del lago de Amatitlán, Guatemala, Aguilar, A., 2018.

A continuación, se presenta un esquema general con el detalle de las partes de los organismos de la familia Chironomidae (Figura 3), estas características son las que permiten identificar hasta género o especie en el sedimento.



(Pérez et al., 2017)

*Figura 3* Esquema general de las partes de la cápsula cefálica de los organismos de la familia Chironomidae.

### 3.5.1.2. Ecología y hábitat

Los quironómidos son cosmopolitas, se encuentran en todas las regiones zoogeográficas del mundo, incluyendo la Antártida (Ashe, Murray y Reiss, 1978). Su hábitat puede variar desde ecosistemas lóticos hasta lénticos. Se encuentran en sustratos orgánicos, sedimentos, rocas arenas, plantas acuáticas, marinos, terrestre, etc. (Armitage et al., 1995). “Son organismos de vida libre y se pueden clasificar entre 6 categorías según su tipo de alimentación: filtrado-colector, recolector, descomponedor, triturador, engullidores y perforadores” (Armitage et al., 1995, p. 137).

Los quironómidos son conocidos por su amplia tolerancia a diversos estresores ambientales (Pérez et al., 2017); los cuales pueden modificar ciertas estructuras anatómicas (Langdon et al., 2006). Según Araneda y colaboradores (2007), el recambio de las especies de la familia Chironomidae se ve afectada por cambios en la deposición del sedimento, específicamente en materia orgánica contenida, concentración de metales y composición mineralógica, entre otros. Según el estudio de Zeng (2014), algunas subfamilias de quironómidos pueden estar relacionadas con aguas deterioradas por pesticidas (i.e. Familia Tanypodinae). Adicionalmente, en el análisis realizado por Langdon y colaboradores (2006), los quironómidos se ven influenciados por varios factores del hábitat, tales como nutrientes inorgánicos: fósforo total, nitrógeno total, etc. Otros estudios paleoecológicos han demostrado que los ensambles de quironómidos responden rápidamente a los

cambios ambientales durante las desglaciaciones. De manera que la paleoecología utiliza a los quironómidos como proxies de la eutrofización y la temperatura. Sin embargo, estos podrían verse afectados por diversas condiciones, y hasta el día de hoy su potencial como bioindicador aún no ha sido explorado lo suficiente. En la actualidad, el poco conocimiento de su taxonomía y ecología representa un gran reto (Armitage et al., 1995), constituyendo una gran oportunidad para futuros estudios.

#### **4. JUSTIFICACIÓN**

Los ecosistemas acuáticos son vulnerables a cambios ambientales, encontrándose algunos severamente degradados (Williamson et al., 2008). Según el estudio de Brenner (1983), las actividades humanas incrementan el flujo de la materia orgánica e inorgánica hacia los ecosistemas acuáticos. Estimulando el crecimiento de ciertos grupos bióticos, y a la vez desfavoreciendo el desarrollo de otros, que son más sensibles a los cambios ambientales. Si la materia orgánica e inorgánicas, en su mayoría proviene de actividades humanas, tales como el cambio de uso de la tierra, el proceso será conocido como eutrofización cultural. Los quironómidos han sido utilizados como indicadores de eutrofia en cuerpos de agua lenticos (Alba et al., 2005). Esta tesis describe los quironómidos presentes en el lago de Amatitlán a lo largo de los perfiles de sedimento, como potenciales bioindicadores de la reducción de la calidad del agua, utilizando la paleolimnología como herramienta para generar nuevos conocimientos (Pace y Groffman, 1998).

El lago de Amatitlán recibe alrededor del 70% de las aguas residuales e industriales sin previo tratamiento, pertenecientes a 7 municipalidades (aprox. 3,000,000 habitantes) del departamento de Guatemala y Escuintla (Instituto Nacional de Estadística, 2014). Estas desembocan en el lago por medio del mayor tributario, el río Villalobos (García, 2002). La geomorfología del lago de Amatitlán se ha visto afectada por la creación del “relleno”, construcción realizada en 1881 para dar paso al ferrocarril; dividiendo el lago en dos partes (este y oeste) limitando el flujo de aguas (Fajardo, 2010). El lago de Amatitlán es considerado un lago hipereutrófico desde el año 1950. “La calidad del agua que ingresa al lago está directamente influenciada por actividades como agricultura y urbanización” (Brezonik y Fox, 1974, p.486; Pérez et al., 2011). La concentración de nutrientes inorgánicos que recibe el lago de Amatitlán supera los límites permisibles con valores de: fósforo, 540 g/L y nitrógeno, 165 mg/L provenientes del río Villalobos y sus tributarios. Recibe un volumen total de 437.5 millones de litros de nutrientes al año (Calderón et al., 2010). A pesar



de ser reportado con altos niveles de contaminación, sirve como corredor biológico para el albergue de avifauna acuática residente y migratorias (AMSA, 2015). Debido a esto, se han utilizado dos puntos de colecta, uno ubicado en el este y otro en el oeste.

Vélez y colegas (2011), han realizado esfuerzos para entender el pasado del lago, sin embargo, quedan vacíos de información como: ¿cuál es la historia de la transición trófica del lago de Amatitlán, de oligotrófico, eutrófico hasta llegar a hipereutrófico? y ¿en qué momento el estado trófico del lago empezó a cambiar?

Para responder estas interrogantes, la paleolimnología nos permite estudiar procesos tróficos a través del tiempo en ecosistemas acuáticos (Smol, 1992, p.49). La paleolimnología utiliza los proxies, como componentes de un archivo ambiental que pueden ser extraídos, identificados y cuantificados (Oldfield, 2005), capaces de generar escenarios pasados del ecosistema en estudio. En comparación con otros insectos, los quironómidos están bien representados en los sedimentos acuáticos, permitiendo reconstruir los cambios en el pasado, por ejemplo, cambios en los estados tróficos y cambios en la temperatura (Armitage, et al, 1995). Lo anterior debido a que responden rápidamente a cambios ambientales (Mackay, 2005). En la actualidad, la especie *C. anthracinus* ha sido identificada en los sedimentos superficiales del lago de Amatitlán como la especie dominante de la comunidad hipereutrófica (Little y Smol, 2000; Quinlan y Smol, 2010; Reavie et al., 2006); de manera que se tiene un referente actual como buen bioindicador de estado ecológico del lago.

Hasta el día de hoy son pocos los estudios que relacionan la eutrofización cultural con los quironómidos en un ecosistema acuático pasado. No obstante, los estudios paleolimnológicos, que utilizan a este proxy como bioindicador de eutrofización cultural, proponen este enfoque como eficiente y novedoso (Langdon et al., 2006; Langdon, Wynne, Sayer y Davidson, 2010; Luoto, Kaukolehto, Weckström, Korhola y Väiliranta, 2014; Massaferrro, 2009; Walker y Mathewes, 1987; Warwick, 1980). La presente investigación es un aporte al conocimiento del pasado de los quironómidos y su potencial para explicar los cambios ambientales relacionados a la eutrofización cultural. Colaborando así con una serie de investigaciones que buscan entender los cambios ambientales a través del tiempo en lagos de zonas altas de Guatemala. Siendo el lago de Amatitlán, un ecosistema acuático de interés para estudiar diferentes proxies (biológicos y no biológicos) por su historia de eutrofización (Lohse, et al., 2018).

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. General**

- 5.1.1. Determinar el potencial de los organismos de la familia Chironomidae (Insecta, Diptera) como bioindicadores de eutrofización cultural en el lago de Amatitlán, Guatemala.

### **5.2. Específicos**

- 5.2.1. Identificar los organismos de la familia Chironomidae presentes en el sustrato vertical de los sedimentos del lago de Amatitlán.
- 5.2.2. Establecer la relación de la presencia de los organismos de la familia Chironomidae con los indicadores no biológicos (nitrógeno total, fósforo inorgánico y carbono orgánico) ligados a los procesos de eutrofización cultural en el sustrato vertical de los sedimentos del lago de Amatitlán.
- 5.2.3. Describir las especies de la familia Chironomidae (Insecta, Diptera) presentes en sustratos verticales de los sedimentos del lago de Amatitlán como potenciales bioindicadores de eutrofización cultural.

## **6. HIPOTESIS**

Los organismos de la familia Chironomidae presentan relación **directa o indirecta** con la eutrofización cultural del pasado reciente (100 años) en el lago de Amatitlán.

## **7. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **7.1. Materiales**

Los materiales utilizados durante la investigación se organizaron siguiendo las principales fases del estudio: colecta de los perfiles de sedimento, separación en secciones de sedimento, análisis de las secciones de sedimento (biológico y no biológico). Estos se detallan en la Tabla No.1.

Tabla 1 *Listado de materiales utilizados por etapa en la presente investigación.*

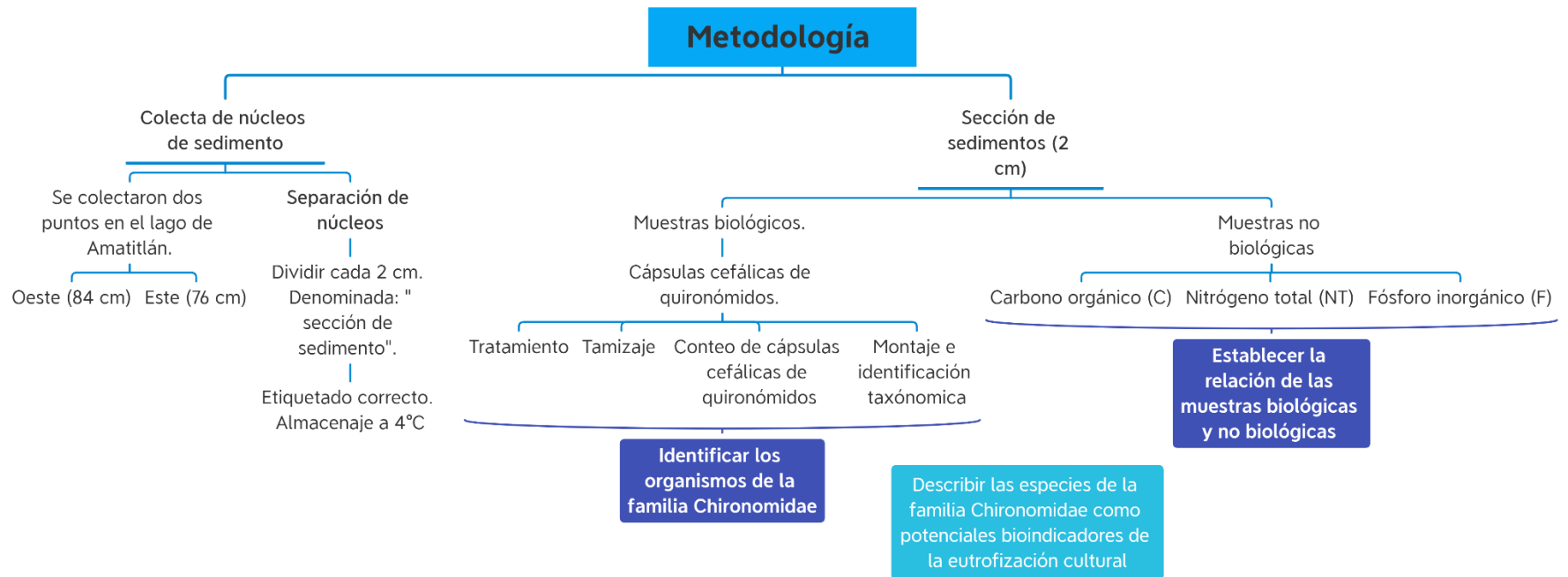
<b>Instrumentos, compuestos y materiales</b>	<b>Descripción</b>
<b>Colecta de perfiles de sedimentos</b>	
<b>Balanza analítica</b>	Capacidad máxima de pesaje 220g y capacidad mínima de pesaje 0.1 mg
<b>Bandeja de plástico</b>	Color: blanco
<b>Bolsas de plástico con cierre de metal</b>	Color: transparente. Tamaño: 135 mm x 210 mm
<b>Bolsas de plástico con cierre de metal</b>	Color: Transparente, Tamaño: 12 por 15 pulgadas.
<b>Bolsas de plástico con cierre</b>	Color: Transparente Tamaño: 5 por 8 pulgadas.
<b>Caja de multiherramientas</b>	Llaves y equipo
<b>Cinta métrica</b>	Cinta métrica de tela
<b>Cuchillo de cocina</b>	Para colecta de muestra
<b>Espátula de cocina</b>	Para colecta de muestra
<b>Pistón con tapones de goma</b>	Tapones de goma
<b>Llave de sierra</b>	Para metales
<b>Rotuladores</b>	Para las muestras
<b>Sonda de profundidad</b>	Cálculo de profundidad para toma de muestra
<b>Tapones</b>	Tapón de goma
<b>Trípode de metal</b>	Para poder apoyar los tubos del perfil.
<b>Tornillos para núcleo</b>	Tornillos de repuesto para el perfil.
<b>Tubo de metal</b>	Tamaño de 122cm
<b>Tubo de plástico</b>	Tamaño de 122cm
<b>Varillas de Metal</b>	1.52 metros de largo
<b>Separación de secciones de sedimento</b>	
<b>Tamiz</b>	Tamices de acero inoxidable, tamaños de poro 0.063 mm
<b>Tamiz</b>	Tamices de acero inoxidable, tamaños de poro 0.212 mm
<b>Aguja para disección recta</b>	Aguja para disección. Diseño en forma de recta. Fabricado a base de acero inoxidable
<b>Espátula</b>	Espátula, Chattaway, acero inoxidable 178 mm
<b>Espátula con cuchara</b>	Espátula, con cuchara en un extremo, níquel, 120 mm
<b>Espátula con mango de madera</b>	Espátula (espátula) con mango de madera y hoja de acero inoxidable.
<b>Frasco lavador (pizeta)</b>	Elaborado de polietileno, volumen: 250 mL.
<b>Kit de Pinzas</b>	Set de pinzas con diferentes tipos de precisión, tipo: 1, 2a, 3c, 5 y 7.
<b>Pincel</b>	Cepillo de pelo de marta talla 2, ancho del cepillo 1 mm.
<b>Sección de sedimentos</b>	
<b>Muestras Biológicas</b>	

<b>Bandejas Porta Objetos</b>	Para 20 o 30 portaobjetos estándar de 76 x 26 mm. Con la tapa cerrada, las muestras se guardan de forma segura en las cavidades.
<b>Cubre objetos</b>	Cubre objetos de vidrio de 22 mm de ancho.
<b>Porta objetos</b>	Portaobjetos de vidrio.
<b>Marcador para portaobjetos Microviales</b>	Produce una barrera hidro repelente permanente punta fina Microviales tipo Eppendorf
<b>Muestras No Biológicas</b>	
<b>C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>6</sub></b>	Ácido ascórbico, polvo 250g.
<b>Filtros Whatmann GF/C</b>	100 unidades
<b>HNO<sub>3</sub></b>	Ácido nítrico, super puro
<b>HO<sub>2</sub>CCO<sub>2</sub>H</b>	Ácido oxálico Clase: Ácido orgánico; Concentración: 99%; Consistencia: Polvo.
<b>H<sub>2</sub>NCH<sub>2</sub>COOH</b>	Glicerina seca
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	Ácido sulfúrico concentrado.
<b>H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub></b>	Ácido Bórico, polvo 1Kg.
<b>HgCL<sub>2</sub></b>	Cloruro de Mercurio en polvo, 5g concentrado.
<b>KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub></b>	Fosfato Monopotásico en Polvo, 500g.
<b>KOH</b>	Hidroxido de potasio, Líquido al 10 %.
<b>K(SbO)C<sub>4</sub>H<sub>4</sub>O<sub>6</sub></b>	Tartrato antimonil potasio, polvo, 100g.
<b>K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub></b>	Peroxidisulfato potásico, 250 g.
<b>(NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub> · 4H<sub>2</sub>O</b>	Heptamolibdato de amonio hepta hidratado, polvo, 500g.
<b>NaOH</b>	Hidróxido de potasio, polvo 500g.
<b>PO<sub>4</sub></b>	Estándar
<b>SO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O</b>	Sulfato de magnesio
<b>Análisis estadístico</b>	
<b>Paquete de R student</b>	Para análisis estadístico
<b>Software C 2</b>	Gráfica vertical de sedimentos

**Fuente:** Elaboración propia

## 7.2. Métodos

Los métodos realizados durante la investigación, se describen detalladamente a continuación y se sintetizan en la siguiente figura (Figura 4).



Fuente: Elaboración propia

Figura 4 Flujograma de métodos realizados durante la presente investigación.

### 7.2.1. Sitio de colecta y colecta de perfiles de sedimentación

Se realizaron colectas de sedimento en dos sitios en el lago de Amatitlán, Guatemala. Los puntos de colecta establecidos siguen la metodología de Vélez et al., (2015, p.4). Los cuales se nombraron como lado “oeste” y “este” (Figura 4). Los sedimentos colectados corresponden a los primeros 80 cm de profundidad del lago. La profundidad del sitio de colecta se midió por medio de una cinta métrica marcada cada metro. Se eligieron puntos lejanos a los afluentes, que representaran una baja tasa de sedimentación para un mejor estudio paleolimnológico (Lohse et al., 2018). Para esto se utilizó el nucleador de sedimento "Livingstone piston corer", descrito en Vélez et al., (2011). Se empleó un tubo de 85 cm de largo y 6.99 cm de diámetro, según la metodología de Fisher et al., (1992). Se realizaron divisiones del perfil vertical cada 2 centímetros, cada división se denominó: “Sección de sedimento”.

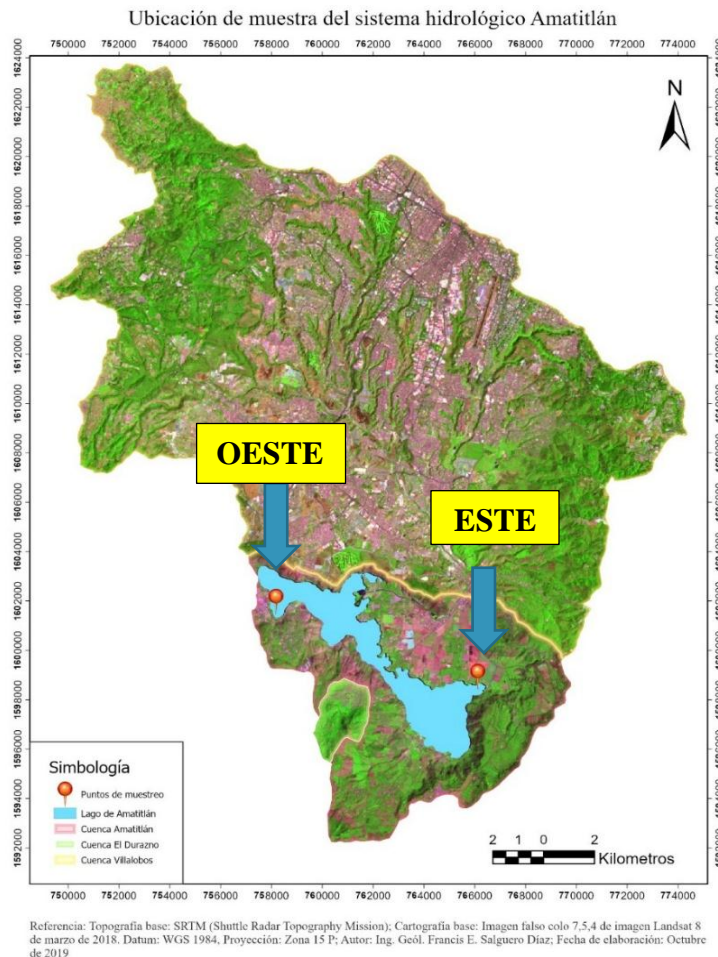


Figura 5 Mapa de localización de los sitios de muestreo Oeste y Este en el lago de Amatitlán.

Fuente: Francis Salguero, 2019. Edición: Alejandra Aguilar

Tabla 2 *Coordenadas de los puntos de muestreo a evaluar durante la presente investigación*

Punto de Muestreo	Coordenadas
Este	N 14°26'45.5" O 90°31'53.7"
Oeste	N 14°28'27.1" O 90°36'17.5"

Finalmente, se utilizaron bolsas de plástico para almacenar los sedimentos, las cuales fueron transportadas hacia la estación biológica de AMSA, se almacenaron a 4 °C. Posterior a la colecta, las muestras de cada sección de sedimento fueron procesadas en el laboratorio de análisis de calidad de agua y sólidos de AMSA. La separación, limpieza e identificación taxonómica de los organismos biológicos sensibles al cambio ambiental, pertenecientes a la familia Chironomidae, se llevó a cabo en el Laboratorio de Investigación y Química Ambiental -LIQA- y el Laboratorio de Entomología Aplicada -LENAP- de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

### **7.2.2. Procesamiento y análisis de muestras no-biológicas**

De cada una de las secciones del sedimento obtenido, se almacenaron 30 gramos para realizar los análisis no biológicos. Estos se empacaron en bolsas de plástico con cierre hermético. Las muestras fueron entregadas al Laboratorio de Suelos de la Facultad de Agronomía, de la Universidad de San Carlos de Guatemala (Usac), en donde se realizaron los análisis de C, NT y F, y posteriormente se realizaron los cálculos de la relación N:F; y C:N:F.

#### **7.2.2.1. Fósforo inorgánico (F)**

Se realizaron pruebas previas para estandarizar el método propuesto por Solórzano y Sharp (1980b), para la cuantificación de F. Para cada sección del sedimento, un total de 10 g fueron diluidos en 10 mL de agua destilada. Esta mezcla fue filtrada con filtros GF/C al vacío, descartando el precipitado resultante. El filtrado obtenido se colocó en viales de vidrio y se sometió a una digestión con MgSO<sub>4</sub>, 0.17 M en un pyrex de 40 x 50 mm por 2.5 hrs. Seguidamente el filtrado se evaporó a 95°C por 2.5 hrs aproximadamente. La muestra se calentó en una mufla a 450°-500° durante 2 horas. Al resultado del procedimiento se le añadió 3 ml de HCl y se calentó a 80°C durante 20 minutos. Se agregaron 7 mL de agua destilada. Se dejó la solución enfriar;

posteriormente se tomó 1 ml de mezcla en un tubo de prueba, con el cual se realizó la curva de calibración para proceder a analizar cada una de las muestras. La cual posteriormente fue de utilidad para cuantificar F por Colorimetría, Espectrofotometría UV/visible.

Este análisis se realizó en el Laboratorio de Agronomía de la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

#### **7.2.2.2. Nitrógeno total (NT)**

Se realizaron pruebas previas para estandarizar el método propuesto por Solórzano y Sharp (1980b), en cada sección del sedimento. Para cada sección del sedimento, 40 mL de muestra se colocó en una botella de teflón de 125 ml. A esta muestra se le añadió un total de 6 mL de solución de oxidación, la cual se preparó disolviendo 6 g de  $K_2S_2O_8$  recristalizada en 100 ml de NaOH 1.5M, agitando en un agitador magnético (la solución se almacenó en la oscuridad y tiene una duración de 8 días). Se utilizó autoclave por 0.5 hrs a 15 libras de presión y 121°C. Después de que la solución se enfrió, se añadieron 6 ml de solución de HCl calibrada 1.0 M. Posteriormente, la solución se trasladó a un Erlenmeyer de 125 mL. Se realizó la curva de calibración con concentraciones conocidas para una mayor precisión de los resultados.

Este análisis se realizó en el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

#### **7.2.2.3. Carbono Orgánico (C)**

Este análisis se realizó a través del Laboratorio de Suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala, esto se realizó a través del método de Walkley y Black modificado.

#### **7.2.2.4. Relación N:F y relación C:N:F**

El análisis de N:F se realizó a través del cálculo de la división de nitrógeno total / fósforo inorgánico. El análisis de C:N:F se realizó a través del cálculo de la división de carbono orgánico / nitrógeno total / fósforo inorgánico.



### **7.2.3. Procesamiento de muestras biológicas**

#### **7.2.3.1. Tratamiento, tamizaje y conteo de muestras biológicas**

De cada sección de sedimento se tomaron 3 gr. Se realizó una de-floculación con KOH al 10 % a 100°C durante 45 minutos, en donde seguidamente se agregó agua. Se obtuvo como producto la separación del flóculo en la muestra. Posteriormente, el sedimento/organismos fueron tamizadas a través de tamices de luz de malla de 212  $\mu\text{m}$  y 63  $\mu\text{m}$  (Massaferro y Brooks, 2002). La totalidad del sedimento/cápsulas cefálicas obtenidas del último tamiz (63  $\mu\text{m}$ ) se observó a través de un estereoscopio óptico, con una magnificación de 10-4X.

Posteriormente, se realizó la separación y los conteos de los organismos existentes según Pérez y colaboradores (2017). Todo el proceso se realizó utilizando pinceles, pinzas finas y agujas de disección. Para el respectivo proceso de separación, ver el siguiente inciso sobre “Tratamiento, identificación y montaje de organismos...”.

Cada grupo de quironómidos obtenidos, según las diferentes secciones del sedimento, se almacenó en microviales debidamente etiquetados hasta su posterior montaje definitivo.

#### **7.2.3.2. Identificación y montaje de organismos de la familia Chironomidae (Insecta, Diptera).**

Para realizar la observación de los individuos, y de los caracteres morfológicos requeridos, fue necesario hacer preparaciones de los individuos con el objetivo de poder verlos en el microscopio. Fueron agregadas en los viales con KOH al 10% en un lapso de 3-5 días, esto con el objetivo de digerir la materia orgánica presente. Los organismos separados, en el paso explicado previamente, fueron preparados cuidadosamente por medio del uso de pinzas finas y colocadas en portaobjetos montadas con una gota de Hydromatix en vista ventral, para ser identificadas por medio de claves dicotómicas (Massaferro y Brooks, 2002; Pérez et al., 2010). Las láminas presentaban una nomenclatura específica para su identificación y toma de fotografías.

La confirmación taxonómica se realizó a través del contacto directo con la Dra. Julieta Massaferro, especialista en Paleolimnología de quironómidos. Los organismos identificados se almacenaron en cajas para láminas fijas y se depositarán en las colecciones de referencia de la Escuela de Biología, de la Universidad de San Carlos de Guatemala para su posterior consulta.

### 7.2.3.3. Propuesta de bioindicadores de la familia Chironomidae para la determinación de la calidad del agua

Posterior al análisis estadístico, a cada uno de estos organismos se le aplicó la herramienta generada para evaluar las especies potenciales bioindicadores de la eutrofización cultural (Tabla 3). Cada especie, fue evaluada para cada una de las características propuestas, según la literatura revisada. Si la especie presenta una de las características, se les asignó un valor mínimo de 1 y un valor máximo de 9. Debido a los objetivos de la investigación, para la característica de “Organismos sensibles a la contaminación”, se le dará una ponderación de 0-3, y para la característica de “Altamente sensibles” a los cambios ambientales una ponderación de 0-2. Las especies propuestas, son las que presenten un valor mayor o igual a 6.

Tabla 3 *Características a evaluar en los potenciales bioindicadores de eutrofización cultural en el lago de Amatitlán.*

N	Característica	Si/no	Punteo (0 -1)
1	Organismos sensibles a la contaminación		
2	Altamente sensibles a los cambios ambientales.		
3	Se preservan bien en los sedimentos y pueden ser identificados hasta morfogénero ó morfoespecie.		
4	Especialización de hábitat.		
5	Taxonomía y ecología bien reconocida		
6	Fáciles de recolectar por ser abundantes		

Obtenido de: Alba-Tercedor y Sánchez-Ortega (1986 p. 53); Heink y Kowarik (2010, p. 3791); Noss (2011, p. 362); Pearson (1994, p. 78); Pérez et al. (2013, p.602).

Posteriormente se construyó una matriz para visualizar aquellos organismos que presenten las mejores características para ser bioindicadores. Posteriormente se realizó una revisión bibliográfica para confirmar las características de los organismos propuestos.

Lo anterior se realizó a través de la elaboración de una matriz conceptual, que fue ponderada según los atributos que para cada uno de estos géneros o especies se reportan en la literatura. Para esto se consultaron 4 libros (Armitage et al., 1995; Cranston, 2010; Epler, 2001; Pérez et al. 2017), 16 artículos científicos (Araneda et al., 2007; Ashe et al., 1978; Broedersen y Quilan, 2006; Chirokey, 2019; De lima, Schäfer, Lanzer, 2013; Laprida et al., 2014;; Little et al., 2000; Luoto et al., 2014;

Matthews-Bird et al., 2016; Massaferró, 2009; Massaferró et al., 2002; Massaferró et al., 2005; Pérez et al., 2013; Quinlan et al., 2010; Scaglotii, 2014; Spies, M., Andersen, Epler, Charles, y Watson, 2009; Di Veroli et al., 2014; Walker et al., 1987; Warwick, 1989; Wu, Porinchu, Horn y Habeyarn, 2014; Zeng, 2014), 1 consulta electrónica (Pratt, N. (comunicación personal realizada 23 de Octubre del 2019)

Finalmente, se consultó a la Dra. Liseth Pérez (experta en paleobioindicadores del neotrópico), la Dra. Julieta Massaferró (experta en sub-fosiles de quironómidos en sedimentos) y el Dr. Narcís Pratt (experto en quironómidos), lo cual fortaleció los datos bibliográficos anteriormente revisados.

### **7.3. Análisis estadístico**

Para el análisis estadístico de la matriz de datos obtenidas a partir de la fase de campo y de laboratorio, las variables biológicas de riqueza, abundancia total y abundancia por especie, fueron representadas en una tabla integrada para el lado oeste y este. Para representar gráficamente los patrones de las variables no biológicas (C, NT, F, relación N:F y relación C:N:F. ) y las biológicas (la riqueza, abundancia total y abundancia por especie) se elaboró un perfil vertical para cada lado (oeste y este). Para realizar los perfiles verticales de sedimento de forma gráfica se utilizó el software de uso libre llamado C2, versión 1.7.7.

Para el lado oeste, con el objetivo de establecer la relación entre las variables no biológicas y biológicas, lo primero que se hizo fue ordenar la base de datos de los organismos de la familia Chironomidae, de la cual se utilizó las abundancias por especie (*C. anthracinus* y *Goeldichironomus*). Se procedió a ordenar la base de datos de las variables no biológicas, para eso, se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP), definiendo el eje de ordenación que explicaba de mejor manera la disposición de los datos. Para realizar dicho análisis, a la base de datos se le aplicó un proceso de homogeneización, eliminando el valor de 0 y aplicando logaritmo (LOG); con el objetivo de hacer la base de datos más simétrica. Posteriormente, para establecer la relación de las variables biológicas y no biológicas del lado oeste, se realizó una relación lineal del eje de ordenación 1 del ACP y las abundancias de los organismos de la familia Chironomidae.

Para el lado este, con el objetivo de establecer la relación entre las variables no biológicas y biológicas, el primer paso fue un análisis de varianza de diseño completamente aleatorizado (DCA), en donde se obtuvieron ejes de ordenación para las variables biológicas. El segundo paso

consistió en ordenar la base de datos de las variables no biológicas, a través de un Análisis de Componentes Principales (ACP), definiendo el eje de ordenación que explicaba de mejor manera los datos. Posteriormente, utilizando el eje de ordenación 1 del ACP y el eje de ordenación de las variables biológica del DCA, se realizó un análisis de relación lineal.

Para integrar el análisis de las variables no biológicas con las biológicas, lado este y oeste por separado, se realizó un análisis de correspondencia canónica (ACC), el cual integró las variables no biológicas y las variables biológicas. Para los análisis anteriores se utilizó el software llamado Past, versión 2.17.

## **8. RESULTADOS**

Durante la colecta de campo se obtuvo dos perfiles de sedimento en dos posiciones geográficas, nombrados durante todo este informe como lado oeste (oeste) y lado este (este), del lago de Amatitlán, Guatemala (Figura 4, Tabla 2). Cada uno de estos núcleos fue analizado posteriormente a su colecta y transporte a las instalaciones donde se trabajaron, separando en secciones de 2 cm de profundidad. Los resultados son presentados con base a los objetivos específicos de esta investigación, así como por perfil de sedimento obtenido.

### **8.1. Variables no biológicas**

#### **8.1.1. Breve descripción de los sedimentos**

Los dos perfiles de sedimento colectados presentaron una capa de materia orgánica negra en los primeros centímetros, esta se mantuvo más constante en el lado oeste, el cual cambió al tipo arenoso en la profundidad de 42 a 44 cm. En el caso del perfil de sedimento del lado este, en su sección superficial, se observó una capa de materia orgánica, variando hacia la profundidad de 30 cm, debido a la presencia de conchas de gasterópodos y presencia de rocas volcánicas, continuando hasta la profundidad de 60 cm. La parte más profunda del lado este presentó un sustrato más arenoso y con menor cantidad de materia orgánica.

#### **8.1.2. Cuantificación de variables biológicas**

La familia Chironomidae (Phylum Artropoda) para los **lados oeste y este** del lago de Amatitlán, presentó a la subfamilia Chironominae como la más abundante. Esta fue representada por tres especies y un género: *Chironomus anthracinus* (*C. anthracinus*), *Goeldichironomus* y *Chironomus plumosus* (*C. plumosus*). Seguidamente se reportó a la subfamilia Tanyptodinae, representada por

tres géneros: *Labrundinia*, *Ablabesmyia* y *Coelotanypus*. En general, el **lado este** evidenció una mayor abundancia de organismos (428 individuos), así como una comunidad más diversa, representada por 9 géneros. En contraste al **lado oeste**, el presentó menor abundancia (20 individuos), representados por 3 géneros, respectivamente.

De todas las especies y géneros identificados taxonómicamente en los dos núcleos de sedimentos, la especie *C. anthracinus* (248 ind) fue la más abundante, seguida del género *Ablabesmyia* (69 ind) y por último del género *Goeldichironomus* (40 ind). A continuación, en la Tabla 4, se presentan características específicas de cada una de las especies y géneros identificados taxonómicamente en este estudio, así como una revisión de su hábitat de preferencia.

Tabla 4. *Subfamilia, descripción, características taxonómicas y hábitat de los géneros o especies de la familia Chironomidae presentes en los sedimentos del lago de Amatitlán, Guatemala.*

Género	Epíteto específico (especie)	Características taxonómicas	Hábitat
<i>Subfamilia: Chironominae</i>			
<i>Cladopelma</i>	No identificada	Mentum con diente mediano doble. A veces, ampliamente redondeado, flanqueado por 7 pares de dientes laterales.	Las larvas, se encuentra en lugares con arena y lodo en lagos y ríos.
<i>Endotribelos</i>	No identificada	Mentum con dorsomentum de 3 dientes medianos; 6 pares de dientes laterales en cada lado, disminuyen en tamaño, 6to diente casi ausente.	Las larvas se encuentran asociadas a macrófitas.
<i>Chironomus</i>	<i>anthracinus</i>	El diente mediano del mentum no se proyecta más allá de los dientes laterales; pecten epipharyngis a peine ancho de dientes múltiples; 1 o 2 pares de túbulos ventrales	Especie reportada en ambientes hipereutrófico, previamente ha sido reportada en el lago de Amatitlán, Guatemala.
<i>Chironomus</i>	<i>plumosus</i>	La diferencia entre <i>C. anthracinus</i> y <i>C. plumosus</i> , es el 4 diente lateral contado desde el centro. En <i>C. plumosus</i> es mayor que el 5to y en <i>C. anthracinus</i> es menor que el 5to.	Especie reportada en ambientes hipereutróficos, previamente ha sido reportada en el lago de Amatitlán.
<i>Goeldichironomus</i>	No identificada	Las larvas poseen un carácter único entre los Chironomini: una gran seta subdentalis en forma de hoz que tiene dientes a lo largo de su margen interior.	Las larvas se encuentran en vegetación o aguas estancadas, algunas se encuentran en sedimentos.
<i>Glyptotendypes</i>	No identificada	Mentum con diente mediano simple, con o sin frenillos laterales, 6 pares de dientes laterales a cada lado, con 4º menor que la línea de disminución lateral.	Ocurren en sedimentos litorales ricos en detritos y estanques, en pequeños cuerpos de agua y agua corriente.

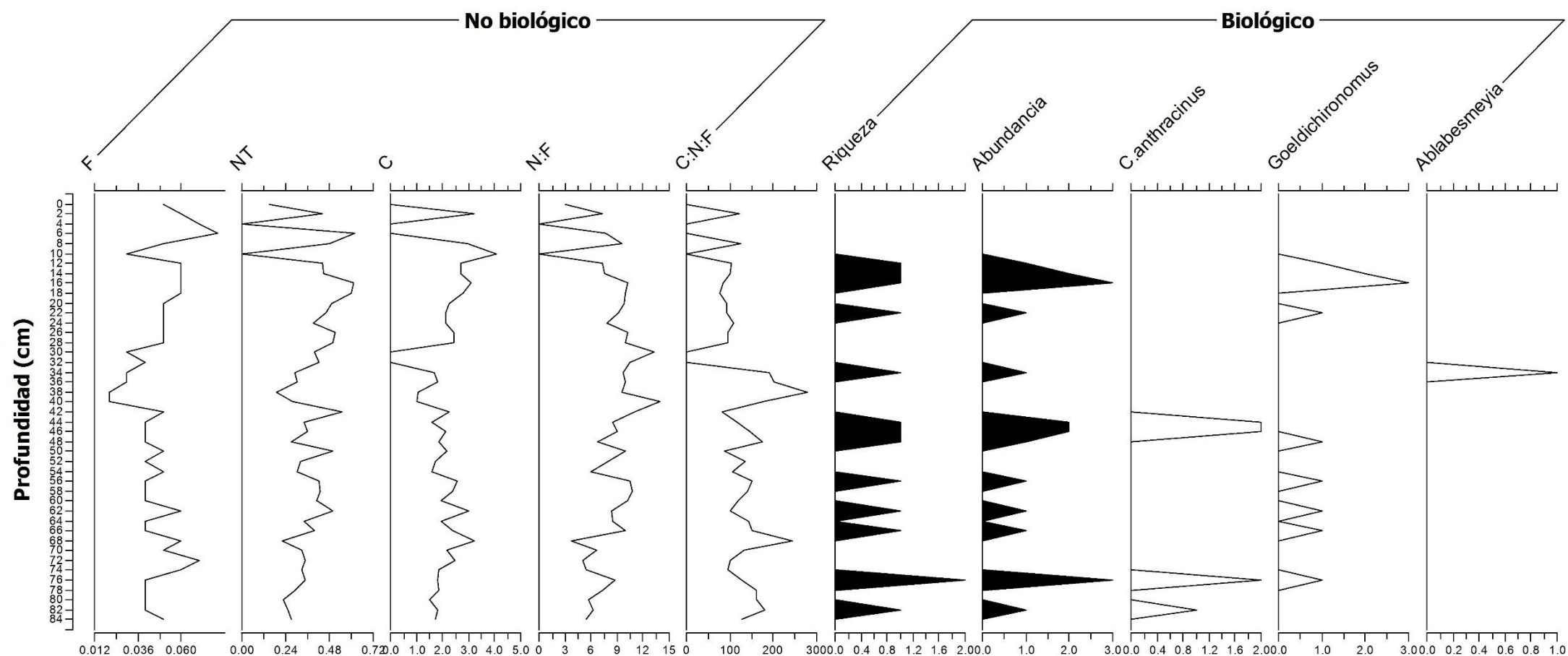
Género	Epíteto específico (especie)	Características taxonómicas	Hábitat
<i>Polypedilum</i>	No identificada	Mentum negro brillante, con dorsomentum distintivo de 4 dientes medianos que sobresalen anteriormente, de los cuales 2 centrales son más bajos que el par externo.	Las larvas existen en todos tipos de aguas (flotantes o estancadas), se encuentra en el sedimento. Ha sido reportada en orillas de lagos eutróficos vinculada a deposición por vientos de algas verde azules.
<i>Subfamilia: Tanypodinae</i>			
<i>Ablabesmyia</i>	No identificada	Palpo maxilar con 2-6 segmentos; pseudorádula no ensanchada posteriormente, no apareciendo unido a la barra transversal; con gránulos de pseudorádula a menudo dispuestos en filas longitudinales	Es una larva que vive en hábitats eutrófico y cosmopolita. Habitan en pequeñas y grandes aguas estancadas y fluidas desde zonas climáticas templadas frías hasta cálidas tropicales. Son abundante en los trópicos.
<i>Coelotanypus</i>	No identificada	Mandíbula con diente apical suavemente curvada, con diente basal bajo y redondeado; lígula generalmente con número impar de dientes, con los dientes internos más externos adheridos a los dientes externos.	Las larvas viven en sedimentos bentónicos de lagos, incluidos embalses artificiales, tramos de ríos que fluyen lentamente y en antiguos lechos de ríos.
<i>Labrundinia</i>	No identificada	La forma de la lígula (con el diente medio más largo que los dientes internos cortos) y los dientes mandibulares internos y molares grandes.	Las larvas viven en pequeños cuerpos de agua estancada, así como en arroyos y ríos.

(Cranston, 2010; Epler, 2001)

### Lado oeste

Para el **lado oeste** se identificaron taxonómicamente un total de 20 individuos, en donde la comunidad biológica fue representada por una especie y dos géneros. En concordancia, también se reportaron bajas abundancias de estos organismos a todo lo largo del núcleo de sedimento. Las mayores abundancias fueron observadas a la profundidad de 76 cm, con un total de 3 individuos, compuesta por la especie *C. anthracinus* (7 ind) y el género *Goeldichironomus* (12 ind); seguido de la profundidad de 16 cm, con tres individuos del género *Ablabesmyia*. Debido a la poca abundancia y diversidad de quironómidos no fue posible realizar posteriores análisis estadísticos.

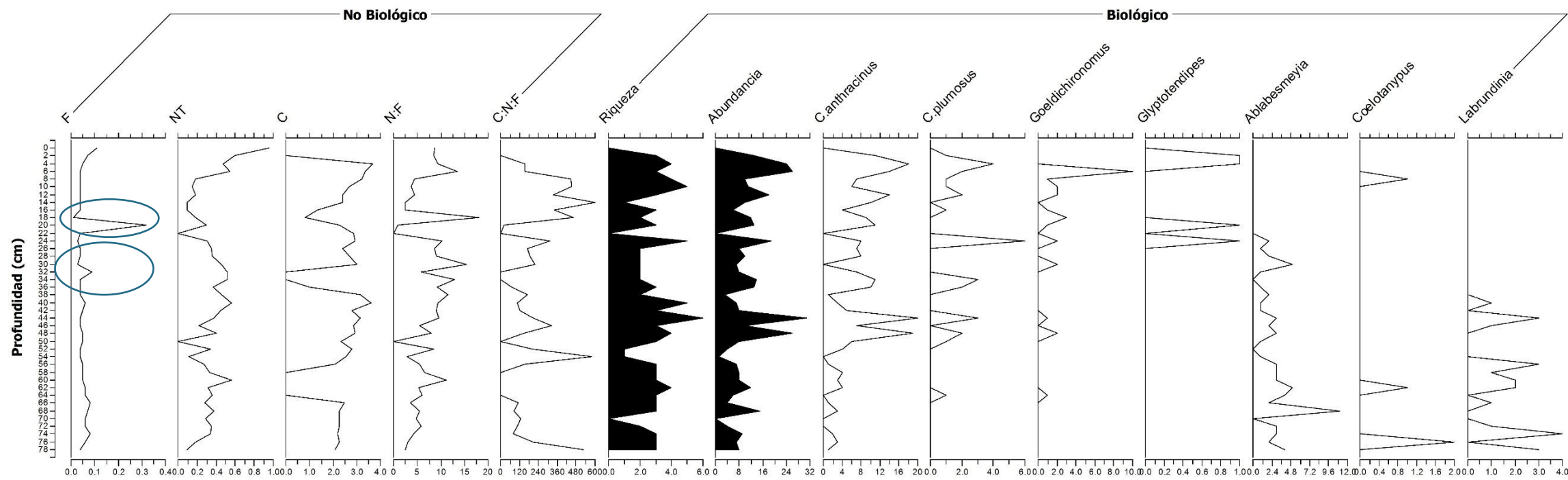
Lado oeste



Fuente: Datos experimentales, 2019

Figura 6. Esquemización de las concentraciones de las variables biológicas (número de individuos, de géneros y/o especies, de organismos de la familia Chironomidae [Orden: Diptera]), no biológicas (parámetros fisicoquímicos [nutrientes inorgánicos e orgánicos (Carbono orgánico-C [ppm], Nitrógeno Total-NT [ppm], Fósforo inorgánico-F [ppm], relaciones C:N:F y N:F] a lo largo de todo el sedimento obtenido del núcleo oeste del lago de Amatitlán, Guatemala. Las profundidades están presentadas cada 2 cm.

Lado este



Fuente: Datos experimentales, 2019

Figura 7. Esquematización de las concentraciones de variables biológicas (número de individuos de géneros y/o especies de organismos de la familia Chironomidae [Diptera]), no biológicas nutrientes inorgánicos e orgánicos (Carbono orgánico-C [ppm], Nitrógeno Total-NT [ppm], Fósforo inorgánico-F [ppm], relaciones C:N:F y N:F, a lo largo de todo el sedimento obtenido del núcleo este del lago de Amatitlán, Guatemala.



## Lado este

Las abundancias cuantificadas e identificadas en los sedimentos del **núcleo este**, así como su riqueza, representaron la mayoría de los organismos identificados durante el presente estudio. A lo largo del núcleo de sedimentos se obtuvieron 428 organismos, correspondiendo al 91% del total de los quironómidos identificados en ambos núcleos. Se reporta la mayor riqueza de especies, representada por un total de dos especies, ocho géneros y una morfoespecie juvenil (Tabla 5).

En cuanto a las abundancias específicas encontradas en segmentos de sedimentos del **lado este**, se pudo observar que en la superficie entre las profundidades 2-14 cm se cuantificaron entre 10 hasta 26 individuos, la mayoría de los mismos correspondiendo a la especie *C. anthracinus*. Seguidamente se observaron mayores abundancias en el segmento de sedimentos de 18-24 cm, correspondiendo también a la misma especie, pero con presencia de otra especie y género, *C. plumosus* y *Goeldichironomus*. específicamente. Se observó una disminución entre los segmentos 26-32 cm (7-10 ind) y 38-42 cm (3-8 ind). Desde la profundidad de 44 cm a 48 cm se observó un incremento en las abundancias, correspondiendo a 10 y 31 individuos, respectivamente. En los segmentos 56-64 cm se volvió a observar una disminución en las abundancias encontrándose estas en un rango de 6-12 individuos. A partir de este punto, se observó un cambio en el ensamblaje, en donde *C. anthracinus* presentó una abundancia constante, y para los géneros como *Ablabesmyia* y *Labrundinia*, empiezan a presentar una mayor representación (Tabla 5). Similares a estas abundancias (7-9 ind) fueron observadas a mayores profundidades, entre 74-78 cm respectivamente. El ensamblaje en este segmento de sedimentos se vio dominada por los géneros *Labrundinia* y *Ablabesmyia* y la especie *C. anthracinus*; con menores abundancias que el género *Coelotanypus*.

Para determinar asociaciones entre las diferentes especies y/o géneros en los sedimentos del **lado este**, se realizó un análisis de correspondencia sin tendencia (DCA, por sus siglas en inglés “Detrended correspondence analysis”). Esto permitió la ordenación de los ensambles de las especies y/o géneros identificados de quironómidos (Figura 8).

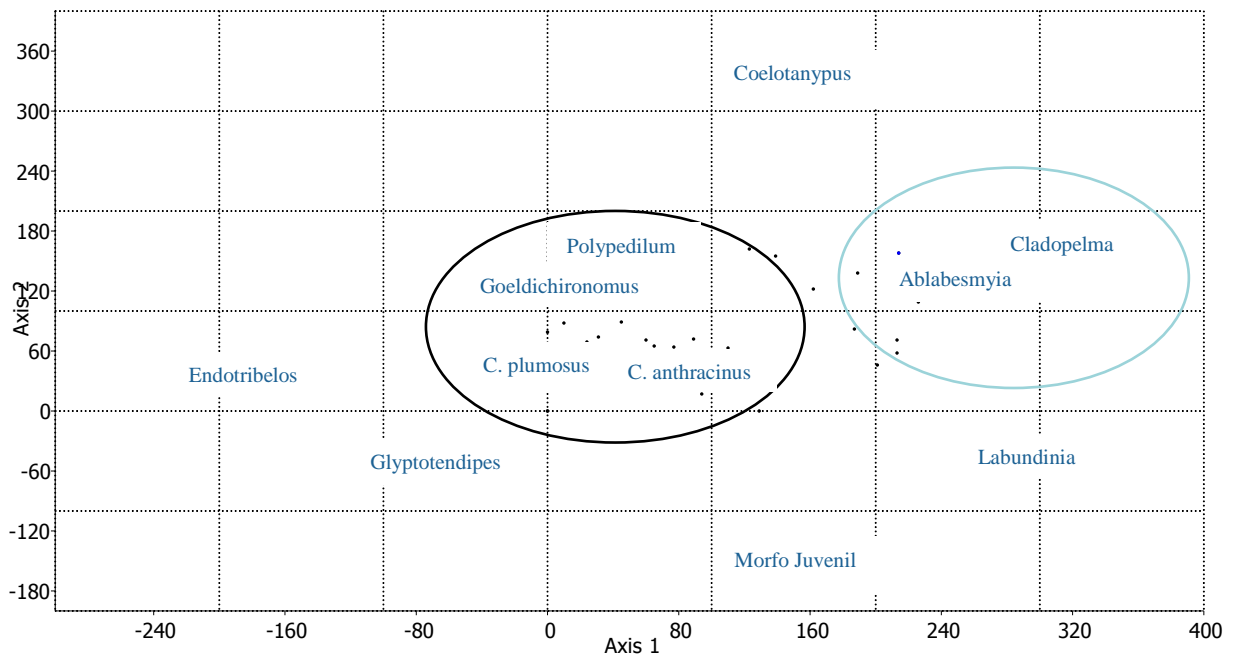


Figura 8. Análisis de correspondencia sin tendencia (DCA, por sus siglas en inglés) de las especies y/o géneros obtenidos en el núcleo este del lago de Amatitlán, Guatemala. Los círculos representan las diferentes agrupaciones identificadas y las abreviaciones observadas representan a las especies o géneros de quironómidos identificados como: *Ablabesmyia*, *Coelotanypus*, *Chironomus anthracinus* (*C. anthracinus*), *Chironomus plumosus* (*C. plumosus*), *Endotribelos*, *Goeldichironomus*, *Glyptotendipes*, *Labrundinia* y *Polypedilum*.

En la Figura 8, se evidencia que los quironómidos encontrados forman dos agrupaciones. La primera agrupación (círculo negro), se conformó de *C. anthracinus*, *C. plumosus*, *Goeldichironomus* y *Polypedilum*, todos pertenecientes a la subfamilia Chironominae. La segunda agrupación (círculo celeste), se conformó de solamente dos géneros *Cladopelma* y *Ablabesmyia*, los cuales pertenecen a las subfamilias Chironominae y Tanyponidae, respectivamente.

### 8.1.3. Relación entre variable biológica y variables no biológicas ligadas a procesos de eutrofización cultural

#### Lado oeste

A lo largo del núcleo del **lado oeste** se encontraron concentraciones de F dentro del rango de 0.08-0.02 ppm. Los valores más elevados se cuantificaron en la sección superficial, a una profundidad de 4-6 cm, mientras que las menores a la mitad del núcleo, 38-40 cm (0.07-0.08

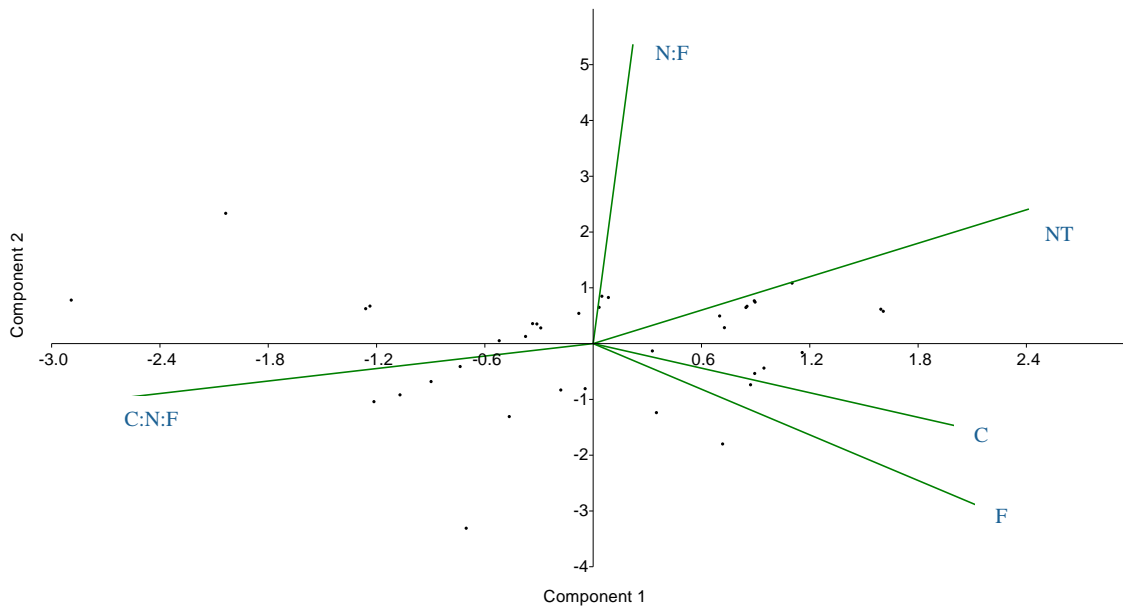
y 0.02; respectivamente). En cuanto a NT, las concentraciones cuantificadas se encontraron dentro del rango de 0.15 hasta 0.61-0.62 ppm, que correspondieron a las profundidades de 6, 16 y 0 cm, respectivamente. Seguidamente, las concentraciones del C se encontraron entre el rango de valores de 4.1, 3.3 hasta 1.1-1.0 (ppm) y correspondieron a las profundidades 40, 30, 0 y 68 cm. Las relaciones C:N:F y N:F se presentan en la Tabla 5. Para el **lado oeste** se observan cambios al comparar cualitativamente las relaciones C:N:F y N:F. Para las relaciones C:N:F, los valores se reportaron mayores de 278.9, 243.2 y 202.2, 190.8 para las secciones de sedimento 38, 68, 36 y 34 cm, respectivamente. Los valores menores reportados fueron de 77.8, 82.5 y 84.7 para las secciones de sedimento 18, 42 y 16 cm, respectivamente. De la relación N:F, se observaron relaciones similares en secciones de sedimento con valores entre 7.3-14 a partir de las profundidades 12 hasta 52 cm. Se observó otro grupo de relaciones con valores relativamente más altos al anterior grupo, con valores que fueron desde 5-10.8 en las profundidades desde 52 hasta 84 cm(Tabla 5).

*Tabla 5. Valores obtenidos de las relaciones C:N:F (Carbono orgánico [ppm]: Nitrógeno inorgánico total [ppm]: Fósforo inorgánico [ppm]) y relación N:F obtenidos en los dos núcleos de sedimentos obtenidos del lago de Amatitlán.*

Oeste					Este				
No de muestra	Valor C:N:F	Valores C:N:F en ppm	Valor N:F	Valores N:F en ppm	No de muestra	Valor C:N:F	Valores C:N:F en ppm	Valor N:F	Valores N:F en ppm
0	0.0	0.0:0.2:0.1	3.0	0.2:0.1	0	0	0.0:1.0:0.1	9	1.0:0.1
2	123.1	3.3:0.4:0.1	7.3	0.4:0.1	2	0	0.0:0.6:0.1	9	0.6:0.1
4	0.0	0.0:0.0:0.1	0.0	0.0:0.1	4	157	3.7:0.5:0.1	9	0.5:0.1
6	0.0	0.0:0.6:0.1	7.8	0.6:0.1	6	156	3.4:0.5:0.0	14	0.5:0.0
8	123.8	3.0:0.5:0.1	9.6	0.5:0.1	8	160	3.2:0.2:0.1	2	0.2:0.1
10	0.0	4.1:0.0:0.0	0.0	0.0:0.0	10	450	2.7:0.2:0.0	4	0.2:0.0
12	103.0	2.7:0.4:0.1	7.3	0.4:0.1	12	333	2.4:0.2:0.0	5	0.2:0.0
14	100.7	2.7:0.5:0.1	7.5	0.5:0.1	14	600	2.4:1.0:0.0	3	1.0:0.0
16	84.7	3.1:0.6:0.1	10.2	0.6:0.1	16	338	1.4:1.0:0.0	3	1.0:0.0
18	77.8	2.8:0.6:0.1	10.0	0.6:0.1	18	461	0.8:0.2:0.0	18	0.2:0.0
20	92.2	2.3:0.5:0.1	9.8	0.5:0.1	20	23	2.3:0.3:0.3	1	0.3:0.3
22	91.7	2.1:0.5:0.1	9.2	0.5:0.1	22	0	2.9:0.0:0.0	0	0.0:0.0
24	108.2	2.1:0.4:0.1	7.8	0.4:0.1	24	315	2.9:0.3:0.0	10	0.3:0.0
26	94.9	2.4:0.5:0.1	10.2	0.5:0.1	26	171	2.4:0.4:0.0	9	0.4:0.0
28	96.8	2.4:0.5:0.1	10.0	0.5:0.1	28	188	2.7:0.4:0.0	9	0.4:0.0
30	0.0	0.0:0.4:0.0	13.3	0.4:0.0	30	217	3.0:0.5:0.0	15	0.5:0.0
32	0.0	0.0:0.4:0.0	10.5	0.4:0.0	32	0	0.0:0.5:0.1	6	0.5:0.1

Oeste					Este				
No de muestra	Valor C:N:F	Valores C:N:F en ppm	Valor N:F	Valores N:F en ppm	No de muestra	Valor C:N:F	Valores C:N:F en ppm	Valor N:F	Valores N:F en ppm
34	190.8	1.7:0.3:0.0	9.7	0.3:0.0	34	0	0.0:0.5:0.0	13	0.5:0.0
36	202.2	1.8:0.3:0.0	10.0	0.3:0.0	36	68	1.0:0.4:0.0	9	0.4:0.0
38	278.9	1.1:0.2:0.0	9.5	0.2:0.0	38	171	3.2:0.5:0.0	12	0.5:0.0
40	178.6	1.0:0.3:0.0	14.0	0.3:0.0	40	107	3.6:0.6:0.1	9	0.6:0.1
42	82.5	2.3:0.6:0.1	11.0	0.6:0.1	42	124	2.8:0.5:0.1	9	0.5:0.1
44	116.2	1.6:0.3:0.0	8.5	0.3:0.0	44	207	3.2:0.4:0.0	10	0.4:0.0
46	146.5	2.1:0.4:0.0	9.0	0.4:0.0	46	324	2.9:0.2:0.0	15	0.2:0.0
48	174.1	1.9:0.3:0.0	6.8	0.3:0.0	48	147	2.9:0.4:0.1	12	0.4:0.1
50	87.2	2.2:0.5:0.1	10.0	0.5:0.1	50	0	2.3:0.0:0.1	0	0.0:0.1
52	135.2	1.7:0.3:0.0	8.0	0.3:0.0	52	204	2.8:0.3:0.0	9	0.3:0.0
54	105.3	1.6:0.3:0.1	6.0	0.3:0.1	54	580	2.6:0.1:0.0	6	0.1:0.0
56	151.8	2.6:0.4:0.0	10.5	0.4:0.0	56	156	2.1:0.3:0.1	5	0.3:0.1
58	139.5	2.4:0.4:0.0	10.8	0.4:0.0	58	0	0.0:0.3:0.1	7	0.3:0.1
60	118.9	2.0:0.4:0.0	10.3	0.4:0.0	60	0	0.0:0.6:0.1	11	0.6:0.1
62	100.7	3.0:0.5:0.1	8.3	0.5:0.1	62	0	0.0:0.3:0.1	5	0.3:0.1
64	143.4	2.0:0.3:0.0	8.5	0.3:0.0	64	0	0.0:0.4:0.1	6	0.4:0.1
66	150.0	2.4:0.4:0.0	10.0	0.4:0.0	66	111	2.5:0.3:0.1	4	0.3:0.1
68	243.2	3.2:0.2:0.1	3.7	0.2:0.1	68	85	2.3:0.4:0.1	5	0.4:0.1
70	132.1	2.2:0.3:0.1	6.6	0.3:0.1	70	129	2.3:0.3:0.1	5	0.3:0.1
72	101.2	2.5:0.4:0.1	5.0	0.4:0.1	72	107	2.3:0.4:0.1	6	0.4:0.1
74	94.9	1.9:0.3:0.1	5.5	0.3:0.1	74	80	2.2:0.3:0.1	4	0.3:0.1
76	128.6	1.8:0.4:0.0	8.8	0.4:0.0	76	208	2.3:0.2:0.1	3	0.2:0.1
78	162.1	1.9:0.3:0.0	7.3	0.3:0.0	78	525	2.1:0.1:0.0	3	0.1:0.0
80	163.0	1.5:0.2:0.0	5.8	0.2:0.0					
82	180.0	1.8:0.3:0.0	6.3	0.3:0.0					
84	128.1	1.7:0.3:0.1	5.4	0.3:0.1					

Con las concentraciones, de las variables no biológicas del núcleo oeste, se realizó un análisis de componentes principales (ACP). Esto con la finalidad de observar cuáles de las variables se encuentran relacionadas y cuáles no. Además, para entender de mejor manera cuál de las variables está probablemente explicando ciertos comportamientos, y luego relacionarlos con las abundancias de los organismos.



*Figura 9* Análisis de Componentes Principales de las variables no biológicas cuantificadas en los sedimentos del núcleo oeste del lago de Amatitlán, Guatemala. Se representan los siguientes valores: C, NT, F, relación N:F, y la relación C:N:F.

Para el Análisis de Componentes Principales (ACP) del núcleo oeste, se observó que los ejes de ordenación para el componente 1 y el componente 2 que constituyeron un total del 90% de explicación de la ordenación de los datos de las variables no biológicas y su asociación. Se observó claramente que las variables F y C se encontraron en el mismo eje de ordenación. Así mismo se observó valores que la relación N:F y NT también se presentaron en el mismo eje de ordenación, siendo diferente al de F y C. Finalmente, la relación C:N:F se observó en el eje negativo y de manera individual, no coincidiendo con ninguno de los otros dos ejes de ordenación, en donde se distribuyeron las otras variables. Las variables que explican la ordenación del eje ACP 1 son: el F con 0.85, C con 0.67 y NT con 0.55.

Para conocer la relación entre la presencia de los organismos de la familia Chironomidae con los indicadores no biológicos analizados (NT, F, C, N:F y C:N:F), se realizó un análisis de relación lineal entre el eje de ordenación de las variables no biológicas, obtenidas a través del ACP, y las abundancias de los organismos presentes en el núcleo oeste: *C. anthracinus* (Figura 8) y *Goeldichironomus* (Figura 9). En este caso, se excluyó el género *Ablabesmyia* debido a que sus abundancias eran muy bajas. Lo anterior permitió explicar los

comportamientos relacionados con las abundancias de quironómidos obtenidas. Los resultados obtenidos de este análisis indicaron que la especie *C. anthracinus* y las variables no biológicas, analizadas para el núcleo oeste, presentaron una correlación positiva insignificante ( $R^2=0.004$ ).

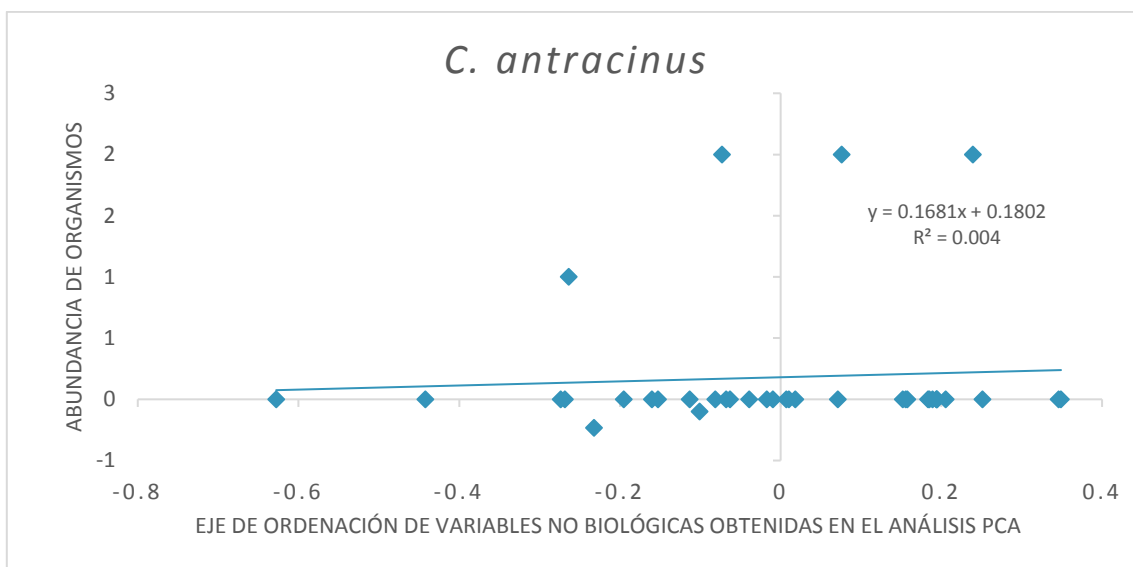


Figura 10 Relación lineal entre el eje de ordenación de variables no biológicas obtenida del análisis de componentes principales (PCA) y la abundancia de *C. anthracinus* en el núcleo oeste.

Para la especie *Goeldichironomus* la relación lineal entre variables no biológicas y las abundancias de este género evidenció una correlación positiva insignificante ( $R^2=0.0446$ ) (Figura 11).

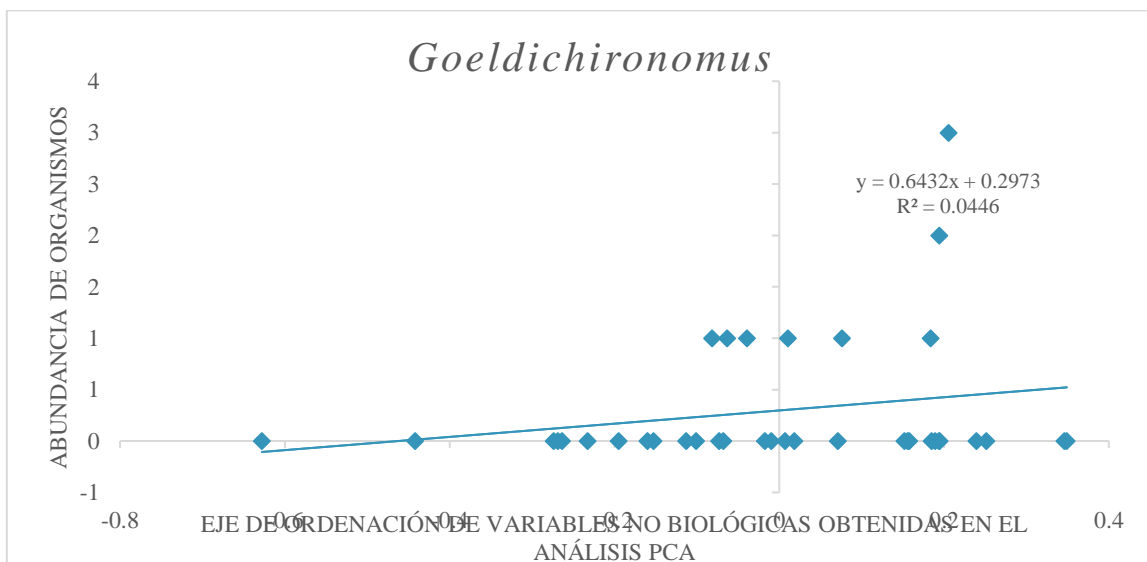


Figura 11 Relación lineal entre el eje de ordenación de variables no biológicas, obtenida del análisis de componentes principales y la abundancia de *Goeldichironomus* en el núcleo oeste.

Para comprender la interacción entre las abundancias de los organismos más representativos observados en los sedimentos, las variables no biológicas analizadas en cada uno de los núcleos de sedimentos, se realizó un análisis multivariado de correspondencia canónica (ACC). Este análisis realiza un gradiente de ordenamiento para las variables no biológicas y permite separar a las especies por nichos ecológicos (Figura 12).

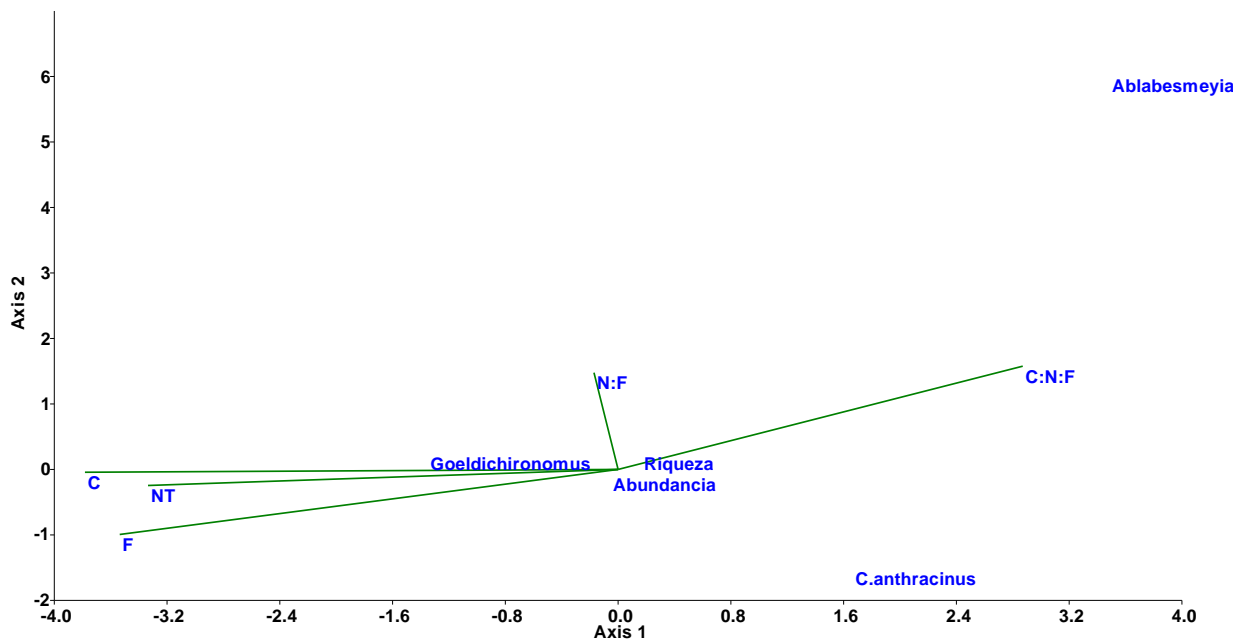


Figura 12 Análisis de Correspondencia Canónica (ACC) resultado de las abundancias y riqueza de los organismos de la familia Chironomidae y las variables no biológicas (carbono orgánico (C), nitrógeno total (NT), fósforo inorgánico (F), relación nitrógeno total y fósforo inorgánico (N:F), y la relación carbono orgánico, nitrógeno total y fósforo inorgánico (C:N:F)), analizadas en los sedimentos del núcleo oeste del lago de Amatitlán, Guatemala.

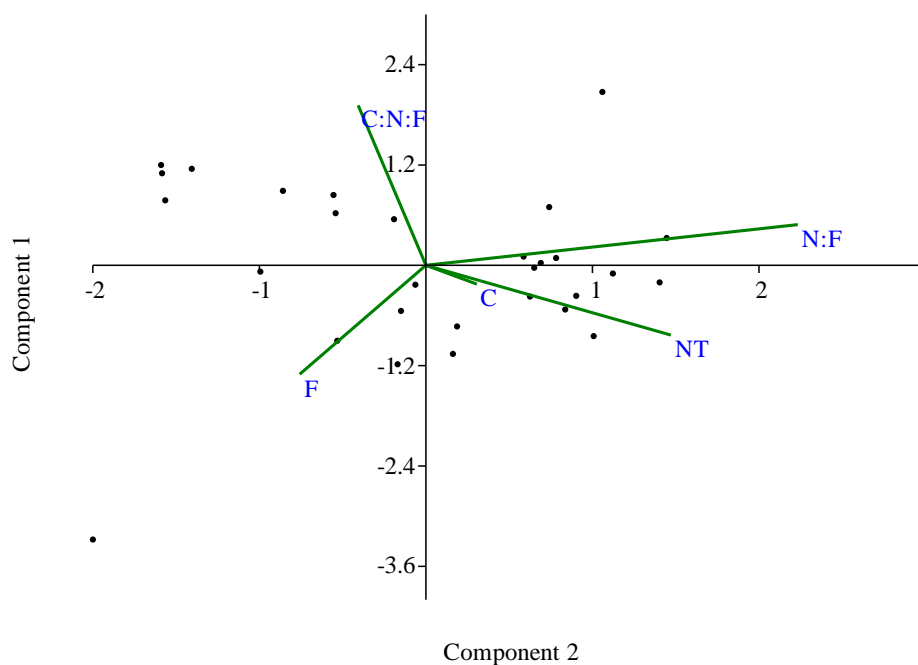
Los resultados del ACC demostraron que las abundancias de los organismos y las variables no biológicas fueron estadísticamente significativas. En la ordenación ACC (Figura 12), el segundo eje explicó el 80% y el tercer eje el 18% de la varianza total. Una de las tendencias observadas fue que las variables *Goeldichironomus*, C, NT y F se localizaron muy cercanos al ser diagramados en la Figura 12. Simultáneamente, se observó la relación C:N:F y la variable abundancia y riqueza correspondiente (Figura 12).

### *Lado este*

Con respecto a las variables no biológicas analizadas, se encontraron concentraciones de F mayores en las secciones más superficiales del núcleo este. Las concentraciones se reportaron dentro del rango de 0.01-0.32 ppm en las profundidades 18 y 20 cm, respectivamente. En cuanto a NT, las concentraciones cuantificadas se encontraron dentro del rango de 0.60 hasta 0.91 ppm en las profundidades de 2 y 0 cm, respectivamente. Las concentraciones de C se encontraron entre el rango de valores de 3.6 ppm para las profundidades 4 y 40 cm, mientras que la concentración más alta en la profundidad de 36 cm con un valor de 1 ppm. Al igual que para el núcleo oeste, en este también se realizaron relaciones entre concentraciones de nutrientes. Los resultados para el **lado este** para las relaciones C:N:F fueron relativamente mucho más altas que para el núcleo oeste. Los valores reportados se encontraron entre el rango de 23.4 y 600, para las secciones de sedimento 20 y 14 cm, respectivamente. En diferentes secciones de sedimentos se observaron concentraciones similares, las mismas se describen a continuación. Desde la superficie hasta la mayor profundidad de sedimentos se observó la primera agrupación con valores de dicha relación entre 156-160 en las profundidades 4-8 cm. Seguidamente, con valores de 333-600 en las profundidades 10-18. Luego en las profundidades de 24-30 cm y 38-48 cm con valores dentro del rango de 107-324. Seguidamente, en las profundidades 52-54 cm con valores dentro del rango de 204-580. Luego en las profundidades de 58-64 cm en donde no se cuantificó C. Finalmente, en las profundidades de 66-78 cm con valores dentro del rango de 85-525 (Tabla 5). Los valores de N:F se reportaron entre el rango de 2-15. Con respecto a las relaciones N:F, se observaron agrupaciones por segmentos de sedimento entre las profundidades de 0-4 cm con valores de 9. Agrupaciones cualitativas en secciones de sedimentos fueron observadas con valores entre 9-16 en la sección de sedimento entre 4 hasta 8cm, respectivamente. Seguidamente con valores menores entre 3-5 en las profundidades 10-16 cm, respectivamente. Relaciones mayores entre 9-15 fueron observadas en las profundidades 24-30. Valores relativamente más bajos, entre 6-12, se observaron en las secciones 38-48 cm. Finalmente, en las secciones más profundas del núcleo, 66 a 78 cm, se observaron los valores más bajos entre 3-6, respectivamente (Tabla 5).



Con las concentraciones de las variables no biológicas, se realizó un ACP con la finalidad de observar la interrelación entre variables.



*Figura 13* Análisis de componentes principales (ACP) de las variables no biológicas cuantificadas en los sedimentos del núcleo este del lago de Amatitlán, Guatemala. Se representan los siguientes valores, de la siguiente manera: carbono orgánico (C), nitrógeno total (NT), fósforo inorgánico (F), relación nitrógeno total y fósforo inorgánico (N:F), y la relación carbono orgánico, nitrógeno total y fósforo inorgánico (C:N:F).

En la Figura 13, se observa los ejes de ordenación componente 1 y componente 2. Los ejes observados explican un 93% la ordenación de los datos de las variables no biológicas analizadas. Adicionalmente, se observan relaciones entre variables como C y NT, quienes se encuentran en el mismo eje de ordenación. Las variables N:F, C:N:F y F, se encontraron distribuidas en diferentes ejes, reflejando que hay una relación positiva insignificante de estas variables a lo largo del núcleo de sedimentos. La variable que explica la ordenación del eje ACP 1 es el F, con un valor de 0.84.

Para conocer la relación entre la presencia de los organismos de la familia Chironomidae con los indicadores no biológicos analizados, se realizó un análisis de relación lineal entre el eje de ordenación de las variables no biológicas, obtenidas a través del ACP y el análisis de las asociaciones entre las diferentes especies y/o géneros identificados en los sedimentos a

través del DCA (Figura 14). Lo anterior permitió explicar los comportamientos de las variables no biológicas relacionadas con las abundancias de quironómidos. Los resultados obtenidos de este análisis indicaron que la especie *C. anthracinus* y las variables no biológicas analizadas para el núcleo oeste presentaron una correlación positiva insignificante ( $R^2=0.0271$ ).

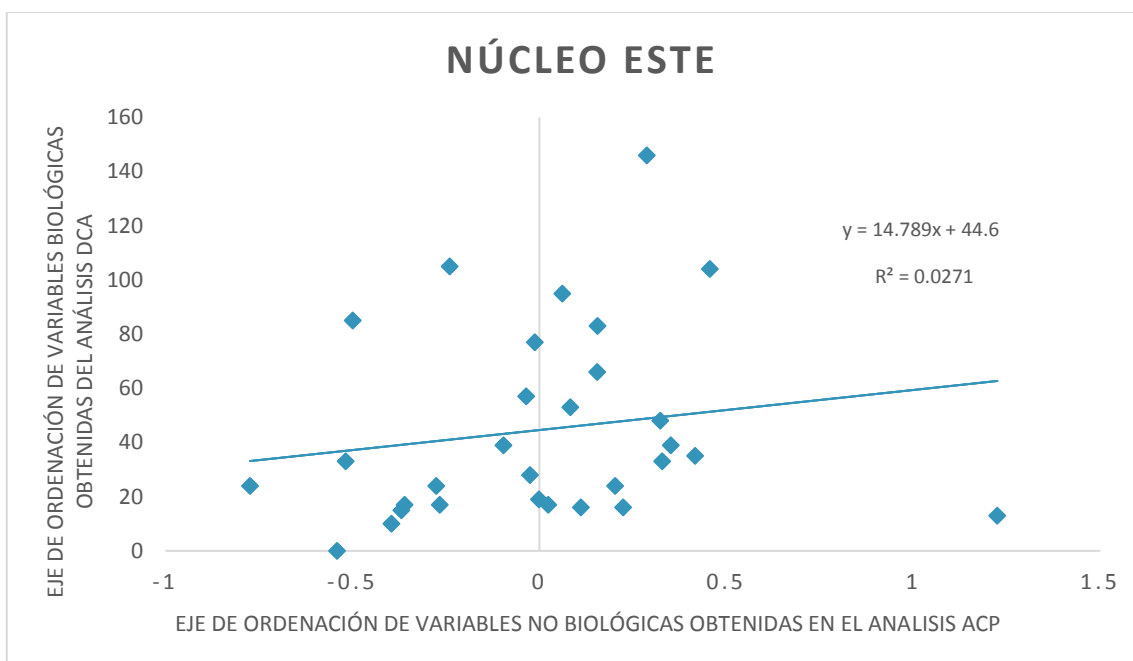


Figura 14 Análisis de relación lineal entre los ejes de ordenación de la variable biológica obtenida entre los análisis DCA y ACP para las variables no biológicas.

Al igual que para el lado oeste, se realizó un ACC (Figura 15) para interrelacionar las riquezas y abundancias de quironómidos con las variables no biológicas. Para este análisis se excluyó a los géneros *Endotribelos* y *Cladopelma*, debido a su poca abundancia en los sedimentos. Los resultados indican que el ACC (eje 1: 49% y eje 2: 27 % de confiabilidad) los géneros *Coelotanypus* y *Polypedilum* se relacionaron con F, mientras que el género *Goeldichironomus*, las especies *C. anthracinus* y *C. plumosus* con N:F y C:N:F, respectivamente.

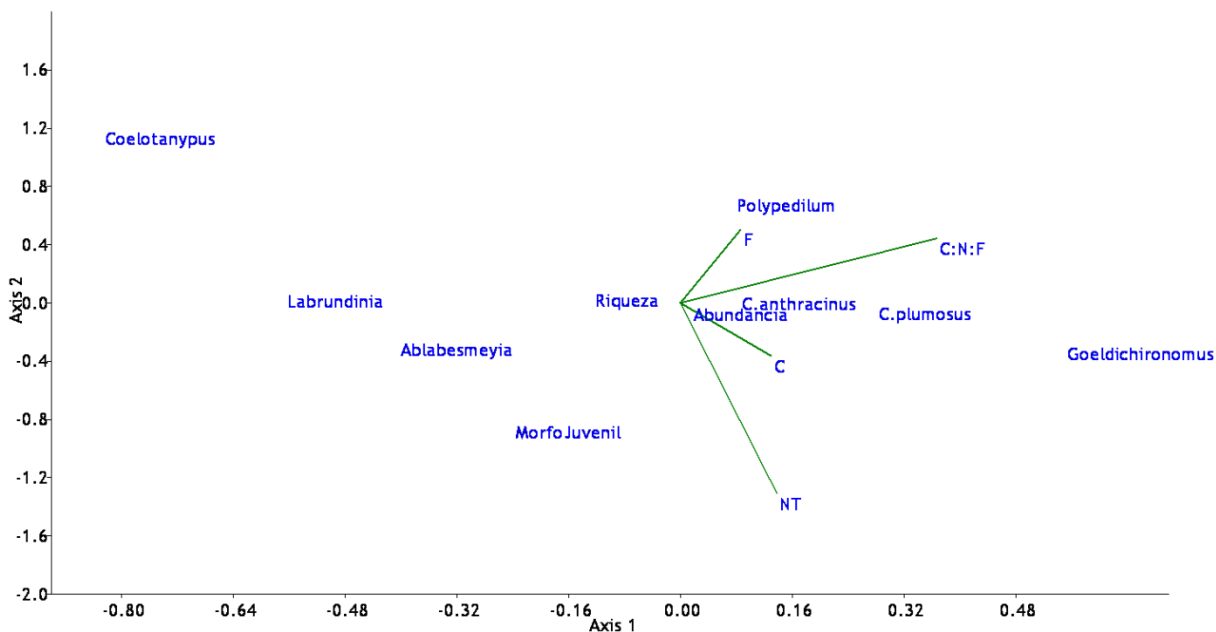


Figura 15 Análisis de Correspondencia Canónica (ACC) resultado de las abundancias y la riqueza de los organismos de la familia Chironomidae y las variables no biológicas C, NT, F, N:F, y C:N:F, analizadas en los sedimentos del núcleo este del lago de Amatitlán, Guatemala.

#### 8.1.4. Potenciales bioindicadores de eutrofización cultural

Los géneros y especies de quironómidos reportadas en este estudio fueron utilizadas y analizadas con la finalidad de identificarlas como indicadores ambientales de condiciones específicas, incluyendo la eutrofización cultural.

La ponderación generada se obtuvo de la evaluación de 6 características contenidas en el rango de 0-9, siendo 0, la no indicación de eutrofización cultural y 9, la indicación máxima, en consecuencia, de eutrofización cultural. Los géneros o especies evaluadas fueron aquellas que presentaron una abundancia de  $\geq 4$  individuos. Adicionalmente, debido a que las características observadas y estudiadas presentan diferentes relevancias y especificidad con el ambiente, por ende mayormente relacionadas con características de eutrofización cultural, se les asignaron diferentes ponderaciones. Se tomaron en cuenta solamente 2 especies y 5 géneros, del total identificado durante la investigación. El detalle de las ponderaciones se explica a continuación:

- Característica 1: *Organismos sensibles a la contaminación ambiental.* Los organismos que cumplieron con esta característica se les asignó una ponderación de 3 puntos.
- Característica 2: *Organismos altamente sensibles a los cambios ambientales.* Los organismos que cumplieron con esta característica se les asignó una ponderación de 2 puntos.
- Característica 3: *Organismos que se preservan bien en los sedimentos y pueden ser identificados hasta morfogénero o morfoespecie.* Los organismos que cumplieron con esta característica se les asignó una ponderación de 1 punto
- Característica 4: *Organismos que son especialistas de cierto hábitat (litoral, zona bentónica, etc.).* Los organismos que cumplieron con esta característica se les asignó una ponderación de 1 punto
- Característica 5: *Organismos que cuentan con una taxonomía y ecología bien reconocida.* Los organismos que cumplieron con esta característica se les asignó una ponderación de 1 punto
- Característica 6: *Organismos fáciles de recolectar por ser abundantes.* Los organismos que cumplieron con esta característica se les asignó una ponderación de 1 punto

Tabla 6 Matriz ponderada de organismos de la familia Chironomidae (Orden: Diptera) como potenciales bioindicadores de eutrofización cultural en núcleos de sedimento del lago de Amatitlán, Guatemala.

No.	Características	Ponderación						
		<i>Chironomus anthracinus</i>	<i>Chironomus plumosus</i>	<i>Glyptotendipes</i>	<i>Goeldichironomu</i>	<i>Ablabesmyia</i>	<i>Coelotanypus</i>	<i>Labrundinia</i>
1	Organismos sensibles a la contaminación ambiental	1	1	1	3	1	1	3
2	Altamente sensibles a los cambios ambientales	1	1	1	2	2	2	2
3	Se preservan bien en los sedimentos y pueden ser identificados hasta morfogénero o morfoespecie	1	1	1	0	1	1	1
4	Especialización de hábitat	1	1	0	1	1	1	1
5	Taxonomía y ecología bien reconocida	1	1	0	0	1	0	0
6	Fáciles de recolectar por ser abundantes	1	1	0	0	0	0	1
<b>Total</b>		<b>6</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>8</b>

Se determinó que los géneros o especies mayores o iguales a 6, son buenos indicadores de eutrofización cultural. El género *Labrundinia*, fue el género con mayor ponderación, totalizando 8. Seguidamente, las especies y los géneros *C. anthracinus*, *C. plumosus*, *Goeldichironomus* y *Ablabesmyia* con un valor de 6 (Tabla 6).

## 9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El lago de Amatitlán ha sido reportado como eutrófico desde el año 1950 (Brezonik y Fox, 1974). Diferentes estudios reportan la degradación ambiental de la Cuenca del lago de Amatitlán por diversas razones, como lo es el cambio del uso de suelo, incremento en la población, pérdida de la cobertura forestal y desarrollo industrial, etc. Derivado de estas actividades, el sobre-aumento en las concentraciones de nutrientes inorgánicos (N y F) provoca el proceso de eutrofización de origen humano, conocido como eutrofización cultural (Liu et al., 2010). Indicadores claros de dicho proceso son los recurrentes florecimientos de algas, específicamente cianobacterias, reportados en la literatura (INE, 2014; Jorgensen, Loffer, Rast y Milan, 2005; Michels et al. 2014; Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales [MARN], 2017 Salguero 2019; Witschey, 2016). En los estudios paleolimnológicos se utilizan diferentes bioindicadores como los componentes de un archivo histórico ambiental identificables y cuantificables (Pérez et al., 2017). La presente investigación tiene como objetivo principal, conocer el proceso de eutrofización cultural a través del estudio de bioindicadores, como lo son los organismos de la familia Chironomidae (Insecta, Diptera), en sedimentos del lago de Amatitlán, Guatemala.

Para la obtención de este objetivo se seleccionaron los sitios de estudio: lado oeste y lado este, siguiendo la propuesta de los monitoreos efectuados por la Autoridad del Manejo Sustentable de la Cuenca y el lago de Amatitlán, así como los descritos en una serie de estudios que plantean diferencias entre ambos sitios (Basterrechea, 1987; Fajardo, 2010; Peckham y Dineen, 1953). En esta cuenta, la discusión de los resultados obtenidos en esta investigación se enfoca en describir las abundancias y riquezas de la variables biológica (organismos de la familia Chironomidae) observadas en los sedimentos analizados, la interrelación entre la variable biológica y las no biológicas (nutrientes) y finalmente, el potencial de bioindicación del proceso de eutrofización cultural de los organismos de la familia Chironomidae reportados a lo largo de los núcleos de sedimento.

## 9.1 Abundancias y riquezas de organismos de la familia Chironomidae en los sedimentos del lago de Amatitlán.

Los organismos de la familia Chironomidae identificados (especie, género y morfoespecie) se presentan en la tabla No. 4, en donde se describen sus características generales y hábitat. Las riquezas y abundancias de los organismos de la familia Chironomidae encontradas durante el presente estudio mostraron diferencias según su ubicación geográfica: oeste y este, específicamente (Tabla No. 4; Figuras 6 y 7). Menores abundancias y riquezas fueron observadas en el núcleo oeste, en donde solamente se identificaron 20 organismos, representados por 2 géneros (*Ablabesmyia* y *Goeldichironomus*) y una especie (*C. anthracinus*). En comparación con el núcleo este, en donde se identificaron mayores abundancias y riquezas identificando a un total de 428 organismos representados por 8 géneros (*Ablabesmyia*, *Coelotanypus*, *Cladopelma*, *Endotribelos*, *Goeldichironomus*, *Glyptotedytes*, *Labrundinia* y *Polypedilum*), 2 especies (*C. anthracinus* y *C. plumosus*) y una morfo-juvenil, sin identificar, haciendo un total de 11 representantes.

Las mayores abundancias de organismos de la familia Chironomidae reportadas para el núcleo oeste (*Goeldichironomus* n=12, *C. anthracinus* n=7) coinciden con sus características de ser reconocidas como especies bioindicadoras de ambientes perturbados, específicamente de ambientes eutróficos a hipereutróficos por causas antropogénicas (Laprida et al., 2014). Adicionalmente, el reporte del género *Ablabesmyia* coincide con la presencia de los anteriores, debido a que el género es reconocido como característico de ser generalista o sin requerimientos específicos (Spies et al., 2009).

La abundancia y riqueza de los organismos de la familia Chironomidae reportados en el núcleo este mostró una presencia predominante de la especie *C. anthracinus* n=248, este) la cual coincide con previos reportes de bioindicación de ambientes perturbados (Deevey, 1957) e hipereutróficos (Pérez et al., 2017). El segundo organismo más abundante fue *Ablabesmyia* (n=69, este). El tercer organismo más abundante fue *C. plumosus* (n=30), reconocido por formar un ensamble con *C. anthracinus*, y ser asociado a ambientes anóxicos (Armitage et al., 1995). Finalmente, el cuarto organismo más abundante fue *Goeldichironomus* (n=28), género que no ha sido reportado previamente para el lago de Amatitlán, Guatemala, sino únicamente para lagos de tierras bajas y para la Laguna Calderas en el mismo país (Arriola,

2012; Pérez et al., 2017; Harmelik, da Silva, y Wojewódka, 2018; Sublette y Sasa, 1994). Su abundancia se observa en la parte más superficial de ambos núcleos, por lo que se sugiere que es una especie reciente en la historia de eutrofización cultural del lago de Amatitlán.

El presente estudio amplía entonces, el número de géneros y especies reportadas de los organismos de la familia Chironomidae, con el nuevo registro del género *Goeldichironomus* para el lago de Amatitlán. Representando un aporte al conocimiento actual de 11 organismos pertenecientes a la subfamilia Chironominae (más abundante) y Tanypodinae, presentes en el pasado del lago de Amatitlán (Tabla 4). Hasta la actualidad, solamente se conocía de su presencia a nivel de familia para los ríos de la cuenca del lago de Amatitlán (Cano, 2018). Los estudios que preceden al presente, son de carácter exploratorio con el objetivo de hacer un inventario de las subfamilias (Tanypodinae y Chironominae) y/o géneros (*Chironomus*) en Guatemala (Arriola, 2012; Deevey, 1957; Sublette y Sasa, 1994) o bien los utilizados como guías de identificación de los grupos (Armitage et al., 1995). Adicionalmente, Armitage y colegas (1995) argumentan que la identificación a especie de la familia Chironomidae, representa un reto diversas razones. Primeramente, por largo proceso de montaje para su identificación, segundo, por sus características taxonómicas específicas (placas ventromediales, mentum y setas subdentalis, etc.) (Figura 3), la carencia de taxónomos en Centroamérica (Pérez et al., 2017) y finalmente por su dificultad en el muestreo por falta de recursos, materiales, plataformas de colecta o fenómenos naturales, entre otros (Ellenberg, 2014).

Así mismo, la presente investigación reportó un total de 20 organismos para el núcleo oeste y un total de 428 organismos para el núcleo este. Las altas abundancias reportadas en el presente estudio son mayores a seis veces reportadas en el único estudio previo para el lago de Amatitlán, n=66 (Pérez, et al., 2011). Es importante mencionar que el presente estudio, evaluando sedimentos verticales o históricos (núcleos de sedimentos), complementa la información existente que solamente consideraba sedimentos superficiales del lago de Amatitlán reportado por Pérez y colegas (2013). Adicionalmente el presente estudio también corrobora la presencia de las especies *C. anthracinus* y *C. plumosus* a todo lo largo de los sedimentos verticales analizados que anteriormente solamente fueron reportados para los sedimentos superficiales del lago de Amatitlán.

En investigaciones futuras, es necesario analizar más taxones presentes en el sedimento correspondientes al presente y pasado del lago de Amatitlán. Esto, con el fin de describir más específicamente el nivel taxonómico (especie o subespecie) de los organismos observados. Una mayor especificación nos permitirán su vez, ampliar más en las abundancias y riquezas de los organismos de la familia Chironomidae así como contribuir a un mayor registro de las subfamilias: Tanytopodinae y Chironominae, que ya han sido reportadas para el lago de Amatitlán, Guatemala.

## 9.2 Relación entre las variables biológicas y no biológicas analizadas y su relación con la eutrofización cultural del lago de Amatitlán

En el año 1997, Basterrechea y Juárez, reportan diferencias en la transparencia y oxígeno entre lado oeste y este del lago de Amatitlán. En el este se cuantificó *aumentos y disminución* durante el período marzo a noviembre de 1985, concentraciones de oxígeno disuelto (1.5-7 mg/L) que el reportado responde a la diferencia en el ingreso de los sedimentos y crecidas del río Villalobos. Adicionalmente, en 1983, Beltrán y otros, reportan diferencias en las transparencias presentes en los diferentes lados oeste (2 m) y este (3 m) del lago y argumenta que durante los años 1974 al 1976 estas responden a una eutrofización progresiva. Los anteriores reportes evidencian que ambos lados del lago (oeste y este) presentan dinámicas ambientales diferentes, que pueden asociarse con diferentes grados de eutrofización por los que se encuentra el lago. Al igual que lo presentado en anteriores reportes, los resultados obtenidos en el presente estudio también evidenciaron esta tendencia relacionada a la ubicación geográfica. Es por esta razón que los resultados serán discutidos según los núcleos de sedimento oeste y este.

### Oeste

Para el lado oeste se observó que cuantitativamente no existe una relación estadística entre las variables no biológicas con las variables biológicas, sin embargo tendencias individuales entre nutrientes y géneros/especies de organismos pudieron ser identificadas de manera cualitativa. Adicionalmente, según los patrones de concentraciones tanto de las variables no biológicas como de la riqueza y abundancia de organismos de la familia Chironomidae fue



posible separar tres secciones basadas en sus profundidades como: sección superficial (0-16 cm), sección intermedia (16-66 cm) y sección profunda (66-84 cm).

### Sección superficial

En la sección superficial (0-16 cm), se observa que las concentraciones de C (10 cm; máx. 4.1 ppm) así como las de F y NT (4 cm; máx. 0.08 y 0.62 ppm; respectivamente) fueron mayores que las reportadas en la sección intermedia (16-66 cm) y sección profunda (66-84 cm) (Figura 6). Simultáneamente, el género *Goeldichironomus* en la sección superficial mostró ser el único organismo reportado, paralelamente sus mayores abundancias (1-3 ind), con respecto a las demás secciones del núcleo de sedimentos analizado. Este género se encuentra asociado a ambientes con abundantes macrófitas, o a zonas litorales; así mismo ha sido reportada en ambientes con concentraciones altas de C tales como los observados en el lado oeste (Armitage et al., 1995; Spies et al., 2009). Las altas concentraciones de C total y en específico la fracción orgánica del mismo, son los responsables de su aumento en ambientes eutróficos (Vollenweider, 1968). Cambios o aumentos en las concentraciones de C son producto de la materia orgánica proveniente de organismos vivos que luego de morir, el material en descomposición se deposita en los fondos de lagos. Es posible que, para esta sección, la presencia de *Goeldichironomus* esté relacionada con los procesos actuales del lago, es decir, que su presencia esté directamente relacionada con la interacción con la vegetación acuática aún presente en el lago de Amatitlán. Esto debido a que este género ha sido reportado en vegetación a la deriva y en los sedimentos del fondo de pequeños cuerpos de agua estancados (Pinder y Reiss, 1983). Adicionalmente, las altas concentraciones observadas de C podrían estar relacionadas a la presencia de florecimientos de cianobacterias, aumento en las poblaciones de *Eichhornia crassipes* (lirio de agua) (Ellenberg 2014), o bien con el aumento en materia fecal proveniente de desechos residuales. El aumento en concentraciones de C en la sección superficial del lado oeste y la presencia del género *Goeldichironomus*, están en concordancia con literatura que reporta su presencia en condiciones hipereutróficas (Laprida et al., 2014).

Los valores de nutrientes que son reportados en la columna de agua para el lago de Amatitlán son bastantes altos, específicamente para NT y F (165 mg/L, 540 g/L, respectivamente) (AMSA 2015). La mayor disponibilidad de nutrientes en el agua hace posible el desarrollo

de comunidades de cianobacterias y macrófitas anteriormente descritas. Consistentemente, para el lago de Amatitlán, estas concentraciones son transportadas hacia el fondo y luego depositadas en los sedimentos del lago. La fijación de F en los sedimentos superficiales del lago Amatitlán es posible cuando se presentan condiciones anóxicas en el fondo, según lo menciona Ellenberg (2014). Los resultados obtenidos en esta investigación evidencian que existió una tendencia de mayores concentraciones de F en las secciones más superficiales, en comparación a secciones más profundas igualmente observadas por Ellenberg (2014).

Varios reportes afirman que el mayor tributario, el río Villalobos, es la principal causa de contaminación que ingresa al lago de Amatitlán, específicamente al lado oeste, por su localización geográfica (Basterrechea, 1987; Cano, 2018; García, 2002; Romero-Oliva et al., 2019). Adicionalmente, el lado oeste presenta el único efluente del lago, siendo este el río Michatoya que desemboca en la cuenca María Linda y finalmente en el Océano Pacífico. El estudio reciente realizado por Romero-Oliva et al., (2019), reporta valores de Plomo (Pb) relativamente más altos para el lado oeste (22-84 ppm) que para el este (1.7-10.2 ppm), y en el caso del Zinc (Zn) los valores (4 y 18 cm, 38 cm; 75 ppm y 15 ppm respectivamente) son evidencia de contaminación antropogénica (Silver y Wozniak, 2001). Los valores bajos del pH reportados en la investigación de Romero-Oliva et al. (2019), para el lado oeste (3.2-6.9), representan el ingreso de sustancias alóctonas con potencial origen de contaminación ambiental, que pueden proceder de contaminación industrial y de aguas residuales (Zhang et al, 2018). Adicionalmente, existen reportes del ingreso de agroquímicos a través del río Villalobos confirmando su impacto negativo en el lago de Amatitlán (Knedel, Chiquin, Pérez y Rosales, 1999).

Adicionalmente, la tasa de sedimentación observada en el lado oeste es mayor en comparación a lado este del lago de Amatitlán (Basterrechea y Juárez, 1987; Brezonik y Fox, 1974; Ellenberg, 2014; INE, 2013; Michael et al., 2014; MARN, 2017; Romero-Oliva. et al., 2019). Según ESI (2001), entre los años del 2001 al 2012 se reportó un ingreso de sedimentos tres veces más alto que los reportados en años previos. AMSA (2015) reporta que para el lado oeste la carga de nutrientes y desechos sólidos que ingresa proviene de 8 municipalidades de la cuenca con sedimentos de origen industrial, agrícola y domiciliario, entre otros. Estos sedimentos son provenientes de una población de alrededor de 1,494, 270

habitantes de los cuales solamente el 25% de las aguas residuales e industriales son tratadas (García 2002; Yalibat y Gándara 1998). Según Basterrechea (entrevista personal realizada el 8 de mayo 2020), en el lago de Amatitlán, el lado oeste presenta una tasa de renovación de sedimentos en la cual el 40% de estos se queda en el sistema y un 60% es drenado a través de Río Michatoya.

### Sección intermedia

En la sección intermedia del perfil de sedimento (16-66 cm) se observó que las concentraciones de NT reportadas (16 cm; máx. 0.61 ppm) fueron mayores, en comparación con la sección profunda del núcleo analizado. Lo contrario fue observado para las concentraciones de F (38-40 cm; min. 0.02 ppm), las cuales fueron las menores concentraciones de las tres secciones identificadas en el núcleo analizado (Figura 6). Los valores de la relación N:F se observaron en un rango entre 14 (40 cm) hasta 6.0 (54 cm) con valores mayormente reportados entre 9-10. Según Vollenweider (1968), los valores de la relación N:F mayores a 9 indican que F constituye al reactivo limitante en el sistema. Basado en los resultados de los análisis de los sedimentos, los que en su mayoría se encuentran 9-10, indican que F corresponde al reactivo limitante para el lado oeste del Lago de Amatitlán. El Lago de Amatitlán presenta una división geográfica artificial creada a partir de la construcción del puente la “Unión” en 1881 (Fajardo, 2010), dividiendo así al lago entre sus lados oeste y este, respectivamente. Es por esto que no existe un flujo de agua o conectividad entre las aguas de ambos lados dentro del lago. Esta división artificial ha generado diferencias en las dinámicas ambientales, en aguas (Basterrechea 1987) y sedimentos (Ellenberg, 2014), así como también diferencias en los reportes de florecimientos de cianobacterias, siendo más recurrentes y más prolongados para el lado oeste, que en lado este (Romero-Oliva et al., 2019).

En la sección intermedia (48 cm) se observó por única vez la presencia del género *Ablabesmyia* (1 ind), el cual coincidió con una disminución en las concentraciones de C (2.1 ppm) y NT (0.46 ppm). Seguidamente, el género *Goeldichironomus* se observó consistentemente (1 ind) en esta sección a diferentes profundidades (16, 22, 48, 56, 62 y 68 cm). Una tercera especie fue reportada para esta sección, *C. anthracinus* (42-44 cm; 2 ind). La presencia de dos géneros y una especie de la familia Chironomidae para la sección

intermedia, podría responder a que en esta sección se presentaron condiciones más aptas que permitieron la presencia de una comunidad más diversa. Lo anterior podría estar relacionado con una disminución en la contaminación derivada de actividades humanas o culturales reportadas, en comparación con sedimentos provenientes de la sección superficial (Romero-Oliva et al., 2019). La presencia de ensamblajes conformados por *Goeldichironomus* y *C. anthracinus* se sabe que son indicadores de cambios ambientales relacionados a nutrientes inorgánicos en el ambiente (Spies et al., 2009). Razón por la cual, basados en los resultados obtenidos, podríamos sugerir que el aumento en abundancia y riqueza de especies para la sección intermedia podría haber respondido a la disminución en contaminantes (Cu [105 y 0.5 ppm], K [0.156 y 0.04 ppb], Na [1,2650 y 4350 ppm], Pb [1784 y 3.0622 ppm], Zn [75 y 15 ppm] y menor pH [3.2 y 4.69]) (Romero-Oliva, et al., 2019). así como en las concentraciones tanto de N (mayores en comparación a la sección superficial) como P (menores en comparación a la sección superficial) reportadas.

#### Sección profunda

En la sección profunda (66-84 cm), se observa que las concentraciones de F (72 cm; máx. 0.07 ppm) son mayores, mientras que las de NT (68 cm; máx. 0.22 ppm) fueron menores que las reportadas a todo lo largo del perfil de sedimento (Figura 6). Los bajos valores de NT, fortalecen la hipótesis de que existen mejores condiciones en el sistema para el ensamble de organismos del género *Goeldichironomus* y la especie *C. anthracinus*. En el caso de los valores mayores de F, pueden ser interpretados como indicadores del cambio de uso de suelo, y como consecuencia de lo anterior, el aumento de estas concentraciones podría deberse a las actividades relacionadas con la agricultura u otras actividades relacionadas con la erosión de suelo.

Con relación a los organismos observados de la sección profunda se reportó la presencia de *Goeldichironomus* (76 cm; 1 ind) y *C. anthracinus* dos veces, a diferentes profundidades (76 cm; 2 ind y 82cm; 1 ind). Según estudios acerca de estos dos organismos, se reporta el ensamble de estas dos especies, las cuales presentan tolerancia a la contaminación. Adicionalmente, el género *Goeldichironomus* en comparación con la especie *C. anthracinus* demuestra ser más sensible con relación a los ambientes con degradación antropogénica

(Fulan y Anjos, 2015). La presencia de *C. anthracinus* en las secciones intermedia y profunda podría ser indicador de altos niveles de eutrofización y bajos niveles de oxígeno (Laprida et al., 2014; Pérez et al., 2013); lo cual es consistente con la indicación de que los estados tróficos en dichas secciones pudieron ser diferentes a los reportados para la sección superficial, en donde solamente se reportó la presencia del género *Goeldichironomus*. Seguidamente, la presencia de *Goeldichironomus* y *C. anthracinus* a lo largo del perfil de sedimento del lado oeste, podría estar relacionado con altas concentraciones de nutrientes contenidos dentro del sistema y en combinación con los fenómenos culturales, como el ingreso de contaminantes. Las concentraciones elevadas de nutrientes reportadas podrían también estar relacionadas a la alta tasa de renovación de los sedimentos, como consecuencia de los aportes de caudal del Río Villalobos (Entrevista personal realizada a Manuel Basterrechea, el 8 de mayo 2020).

La presente investigación sirve de evidencia de la poca diversidad biológica contenida en el sistema, lo anterior, a través de la diversidad y riqueza de los organismos de la familia Chironomidae a lo largo del tiempo, reportando dinámicas biológicas con bajas abundancias. Sin embargo, es necesario realizar más estudios para corroborar si las bajas abundancias de los organismos de la familia Chironomidae que se reportan están relacionadas a la necesidad de aumentar el esfuerzo en el análisis de muestras o bien si es un resultado indicador de altos niveles de degradación ambiental, en consecuencia, de condiciones sin los requerimientos mínimos para que dichos organismos puedan sobrevivir.

Tomando en cuenta que el lado oeste presenta niveles de contaminación considerablemente altos, es importante ubicar al género *Goeldichironomus* como uno de los organismos más abundantes en dicho lado (Tabla 6). El género ha sido reportado con la característica de ser tolerante a cambios ambientales y a niveles altos de nutrientes en ecosistemas acuáticos clasificados como eutróficos e hipereutrófico por causas antropogénicas (Laprida et al., 2014), así también ha sido reportada en vegetación a la deriva y en los sedimentos del fondo de pequeños cuerpos de agua estancados (Pinder y Reiss, 1983).

## Este

En el lado este se observó que cuantitativamente existe una relación, que, aunque insignificante ( $p > 0.0200$ ), demuestra una relación entre las variables no biológicas y las variables biológicas. Así mismo, al igual que para el lado oeste fue posible observar tendencias individuales entre las concentraciones de nutrientes y los géneros/especies de organismos identificados a lo largo de todo el sedimento. Adicionalmente, según los patrones de concentraciones tanto de las variables no biológicas como de la riqueza y abundancia de organismos de la familia Chironomidae fue posible separar tres secciones basadas en sus profundidades como: sección superficial (0-18 cm), sección intermedia (18-48 cm) y sección profunda (48-78 cm), similar al lado oeste.

### Sección superficial

En la sección superficial (0-18 cm) se observó que las concentraciones de C (4 y 6 cm; máx. 3.68 ppm), F (0 cm; máx. 0.11 ppm) y NT (0 cm; máx. 0.96 ppm) fueron mayores que las reportadas en la sección intermedia y sección profunda (Figura 7). Paralelamente, la especie *C. anthracinus* (104 ind) en la sección superficial fue la más abundante de todos los organismos reportados. Altas abundancias en ambientes ricos en nutrientes inorgánicos o altamente productivos podrían estar relacionadas a que *C. anthracinus* posee niveles de tolerancia bastante altos, por ejemplo, ante la presencia de condiciones de bajas concentraciones de oxígeno y hasta anóxicas en el sedimento. Específicamente esta especie puede ser reportada en dichos ambientes debido a la presencia de una sustancia similar a la hemoglobina, la cual le permite abastecer de oxígeno su metabolismo y por consiguiente sobrevivir a este tipo de ambientes (Armitage et al., 1995). La alta abundancia de *C. anthracinus* para el lado este puede ser utilizada como un indicador de las altas concentraciones de nutrientes, tales como el F, NT y contaminación en el sistema (Pérez et al. 2010).

Una diferencia notable entre las condiciones del lado oeste y el este son observables en las variables no biológicas y biológicas recopiladas por el presente estudio. Esta diferencia podría estar ligada a la falta de conectividad entre las aguas de ambos lados dentro del lago

que generó las diferencias ambientales observadas, en este caso, principalmente en el ensamble y las abundancias de los organismos de la familia Chironomidae.

Seguidamente, el segundo género más abundante reportado en la sección superficial fue *Goeldichironomus* (20 ind), con las mayores abundancias con respecto a las demás secciones de sedimento analizadas. Así mismo, sus altas abundancias fueron observadas cuando las relaciones N:F fueron mayores, como por ejemplo a los 6 cm (13.5 y 10 ind) y a los 18 cm (18 y 3 ind) (Tabla 5). Según Vollenweider (1968), valores de N:F mayores a 9 son indicadores que F constituye el reactivo limitante; mientras que cuando los valores de dicha relación son menores a 5, es el NT el reactivo limitante en el sistema. De esta cuenta, para la sección superficial podría sugerirse que el F es el reactivo limitante. Así mismo, la literatura reporta la asociación del género *Goeldichironomus* ACC (Figura 15) con la vegetación acuática presente en el lago de Amatitlán, para ambos lados, que a su vez coincide con un incremento y frecuencia de florecimientos de cianobacterias y vegetación acuática, reportadas principalmente a causa de ingresos de aguas residuales (Cano, 2018). Finalmente, la especie *C. plumosus* (12 ind), fue la tercera más abundante para la sección superficial, la cual es únicamente reportada para el lado este, en la presente investigación. Dicha especie posee un alto grado de tolerancia a niveles de estrés ambiental o hipoxia (concentraciones de oxígeno bajas o nulas), así como ser característica de ambientes con alta productividad que van desde eutróficos a hipertróficos (Brodersen y Lindegaard, 1999; Brodersen y Quinlan, 2006; Quinlan y Smol, 2010).

El ensamble de especies observado para la sección superficial del lado este (0-18 cm), tiene una composición similar a la observada también en la sección superficial del lado oeste (0-16 cm). Paralelamente, se observa que las concentraciones de nutrientes son responsables de un aumento en los niveles eutróficos del lago (Vollenweider, 1968). Las altas concentraciones de C, NT y F cuantificadas en la sección superficial del lado este podrían responder a la limitada circulación de sus aguas y casi nulo intercambio de las mismas con el lado oeste. También, derivado de la poca circulación, puede existir un aumento en la temperatura del agua, creando otras condiciones ambientales que permiten el desarrollo de comunidades biológicas diferentes a las observadas en el lado oeste. Adicionalmente, es posible que el ingreso alóctono de nutrientes esté en relación con las actividades humanas

derivadas de contaminación doméstica, agrícola e industrial, como ya ha sido anteriormente reportado (Cano 2018). Todas las anteriores condiciones, muy probablemente han ocasionado el aumento en florecimientos de cianobacterias, en su mayoría provocados por *Microcystis aeruginosa* y *Lyngbya limnetica*; las cuales a su vez se asocian con las plantas acuáticas *Elodea sp.* y *Eichhornia crassipes*. La combinación entre las concentraciones elevadas de nutrientes, junto con la presencia de este ensamble de vegetación acuática son un claro reflejo de los altos grados de eutrofización ya reportados para el lago de Amatitlán (Beltran, Basterrechea, Juárez, Cerrato, Molina, 1985; Cano, 2018; Ellenberg, 2014; Peckham y Dineen, 1953). Sumado a lo anterior, la presencia de otro género, como el caso de *Coelotanytus* (8 cm; 1 ind) para el lado este, así como su asociación con las mayores concentraciones de C (3.23 ppm), son claros indicadores de alta productividad en el sistema y por ende eutrofización. Este género es indicador de aguas estancadas, con preferencia de hábitat en el fondo en pantanos, estanques con sedimentos suaves y las porciones más lentas de arroyos y ríos (Morrisey, 1950; Spies et al., 2009).

Según Cano (2018), el río Pampumay es el tributario principal del lado este, el cual cuenta con un caudal de un promedio de 71 L/s. Dicho río no forma parte de la cuenca del río Villalobos y su aporte es directo en el lado este, con únicamente el 2.71 % del ingreso de aguas al lago de Amatitlán, a diferencia de la cuenca del río Villalobos, la cual aporta más del 95 % del agua que ingresa al lago de Amatitlán y descarga sus aguas en el lado oeste del lago (Cano, 2018). Adicionalmente, el lado este presenta una única salida del flujo de agua, que es hacia el lado oeste, dicha dinámica se observa desde 1881, a partir de la construcción del puente la Unión para el paso del ferrocarril (Fajardo, 2011). El flujo entre ambos lados del lago, ocurre en el mismo sitio, esto provoca poca circulación, aun así, en el lado este ingresan nutrientes provenientes del río Villalobos, y a su vez salen para llegar junto con los nutrientes del oeste al afluyente del río Michatoya. A diferencia de la cuenca del río Villalobos, la cuenca del río Pampumay tiene características de cuenca rural con pocos asentamientos y baja variación en el uso del suelo, lo que permite el drenaje de agua de buena a mediana calidad sólo para el lado este del lago de Amatitlán (Cano, 2018). Debido a las características del uso de suelo, podríamos suponer que los nutrientes tienen un origen más autóctono. Dicho fenómeno se ha visto reflejado en la estabilidad del sedimento del lado este, donde se reportaron valores de pH estables entre 7-7.6 a lo largo de la columna de sedimentos



analizada (0-84 cm) (Romero-Oliva et al., 2019). Este fenómeno podría explicarse por la baja tasa de renovación (5 %) representando que el 95% de los sedimentos no son intercambiados o drenados fuera del lado este y por consiguiente del lago de Amatitlán (Basterrechea, comunicación personal realizada el 8 de mayo 2020).

### Sección intermedia

En la sección intermedia del perfil de sedimento (18-48 cm) se observó que las concentraciones de NT reportadas (40 cm; máx. 0.56 ppm) fueron menores en comparación a la sección superficial del núcleo analizado. En el caso de las concentraciones de F, similares concentraciones fueron observadas en tres secciones identificadas en el perfil de sedimento (Figura 7), a excepción de la sección de sedimento a 20 cm (0.32 ppm) y a 32 cm (0.9 ppm), en donde se reportaron las concentraciones mayores de todo el perfil de sedimento del lado este. A lo largo del núcleo se pudo observar cambios en los tipos de sedimento, siendo estos de tipo volcánico (18-38 cm) y de tipo granuloso (desde 38-48 cm). Un dato interesante es que en ambos tipos de sedimento, específicamente en las profundidades 18 y 36 cm, se observó la presencia de gasterópodos en degradación. Es importante tomar en cuenta, que los gasterópodos son pobres indicadores del pasado ambiental debido a que son organismos generalistas, toleran los cambios ambientales y la taxonomía dulceacuícola es poco conocida. A pesar de eso, tienen la característica de conservarse bien en los sedimentos por lo que son un grupo interesante a considerarse para estudios a futuro, primero descriptivos y luego ecológicos y cuantitativos (Pérez et al., 2017).

Las agrupaciones de rocas volcánicas en las secciones 14-22 cm y 28-36 cm, coincidieron con las concentraciones más altas de F reportadas, anteriormente descritas. Esto está en congruencia con el anterior reporte de diferencias significativas entre sedimentos, evidenciando que mayores concentraciones de F fueron asociadas a la presencia de rocas volcánicas Ellenberg (2014). Por lo anterior podemos suponer, que las concentraciones mayores de F observadas provienen de la presencia de roca volcánica en el perfil de sedimento del lado este y en esta sección. Así mismo, según la entrevista realizada a la Dra. Margaret Dix (comunicación personal realizada el 8 de mayo 2020), las rocas volcánicas pueden ser archivos e indicadores de erupciones volcánicas. En este caso, varios momentos geológicos, como erupciones volcánicas, han sido registrados en los años anteriores, con

procedencia de diferentes volcanes, el más reciente siendo la erupción del Volcán de Fuego en el 2018, el cual tuvo un impacto directo en el casco urbano de Amatitlán. Seguidamente, otra erupción por el Volcán Pacaya, con diferentes registros reportados por el INSIVUMEH, impactando Amatitlán en los años: 1987, 2000 y 2010, esta última con mayores efectos ya que fue seguida de la tormenta del Agatha (CONRED, 2018). La presencia de rocas volcánicas en el sedimento es un registro de la alta actividad volcánica alrededor del lago de Amatitlán.

Las concentraciones de C en la sección intermedia fueron disminuyendo en relación a la profundidad (20 cm; máx. 2.25 ppm – 36 cm; min. 1 ppm). Tal como se observa en la Figura 7, a mayor profundidad se observó una menor concentración de C. En el caso de los valores de C:N:F, se observaron bastante altos: 461 (18 cm), 315 (24 cm) y 323 (46 cm) comparados con el oeste (38 cm; máx.: 279). Dichos valores, podrían ser producto de la productividad primaria y los cambios en el uso de suelo evidenciados en este lado del lago. Similares tendencias relacionadas con actividad antropogénica, clima y ambientes han sido documentadas en el estudio paleolimnológico realizado por Vélez et al., (2011). Así mismo, los autores concluyen que la ocupación de los mayas, tuvo un efecto directo en la estabilidad del suelo y la vegetación, es decir: a mayor población, menor estabilidad de suelo y mayor abundancia de poáceas, como *Zea mays*. En contraste, se describe que una mayor estabilidad de suelo y mayor abundancia de árboles existió en presencia de una menor población humana. Reportes previos, han descrito que el lado este presenta concentraciones altas de Fe (28 cm; 15625 ppm), Mg (44 cm; 0.22 ppm), Pb (46 cm, 8.3 ppm) Zn (26 cm; 35 ppm) (Romero-Oliva et al., 2019), los cuales pueden ser indicadores de actividades antropogénicas. Según la literatura, el ingreso por escurrimiento de altas cantidades de Mg podría estar relacionada con actividades agrícolas y al uso de fertilizantes (Montalvo et al., 2014.). Además, presencia de altas concentraciones de Pb, en ambientes acuáticos, está asociado a diferentes fuentes de origen entre ellas la gasolina (Silver y Wozniak, 2001). Específicamente, para el lago de Amatitlán la agricultura que se realiza en el lado este se relaciona al cultivo de tomate, caña de azúcar, cebollas, chile pimiento, entre otros (Romero-Oliva, et al., 2014).

Sin embargo, para confirmar lo anterior, será necesario contar con la datación de los sedimentos incluida en Waters et al., en preparación, la cual permitiría hacer una referencia

histórica a florecimientos de cianobacterias, dinámicas poblacionales de las plantas acuáticas, entre otros. Estas contribuyen grandemente a la productividad del sistema, elevando los niveles tróficos en cuerpos de agua (Romero-Oliva et al., 2014). La confirmación del origen de la materia orgánica en los sedimentos del lado este son indicadores de las condiciones ideales para ensambles de especies vinculadas con los niveles tróficos elevados, tal como se refleja en las abundancias de quironómidos de la sección intermedia.

Las especies *C. anthracinus* (106 ind) y *C. plumosus* (16 ind) se mantuvieron constantes a lo largo de esta sección intermedia, sin embargo, para las abundancias del género *Goeldichironomus* (7 ind) se observó una disminución, en comparación con la sección superficial. Seguidamente, en el caso de los géneros *Ablabesmyia* (24 ind) y *Labrundinia* (5 ind), se observó un incremento en sus abundancias con respecto a la sección superficial. Específicamente, el género *Ablabesmyia* (Figura 15) según el ACC realizado entre organismos de la familia Chironomidae y nutrientes cuantificados, demostró estar relacionado a concentraciones de C y NT. Registros de varias especies pertenecientes a este género, según información reportada para el neotrópico, indica que su presencia está relacionada a estratos granulosos de gran a mediano tamaño, presencia de materia orgánica y a temperaturas cálidas (Araneda et al., 2007; Urrutia, 2010). Sin embargo, debido a la poca información y conocimiento acerca de la ecología de los organismos de la familia Chironomidae en Guatemala, se especula que el género *Ablabesmyia*, podría ser indicador de lo anterior para el lago de Amatitlán.

Los diferentes estratos de sedimento (rocoso, granuloso de gran tamaño a mediano, la presencia de roca volcánica, y otros), observados en la sección intermedia del lado este, son evidencia de los cambios ambientales ocurridos a lo largo del tiempo en el lago de Amatitlán. Las menores concentraciones de nutrientes (NT y F) así como de C, sumado a la presencia de un ensamblaje de quironómidos con mayor riqueza (2 especies y 3 géneros), podrían indicarnos la transición de un estado menos trófico (intermedia) a uno de mayor eutrofización (superficial) en el lago de Amatitlán. Evidenciando a la paleolimnología como una herramienta multidisciplinaria que permite los cambios que quedan archivados en los sedimentos a través del tiempo, en el caso particular del lado este del lago de Amatitlán.

### Sección profunda

En la sección profunda (48-78 cm), se observó que las concentraciones de C (56 y 78 cm; min. 2.1 ppm) así como las de F (53 ,54, 79 cm; min. 0.04 ppm) y NT (54 y 78 cm; min. 0.11) fueron menores que las reportadas en las secciones superiores (Figura 7). En dicha sección se observa una mayor riqueza de organismos de la familia Chironomidae (2 especies y 5 géneros). El aumento en la riqueza y abundancia permitió la conformación de varias agrupaciones observadas en el DCA (Figura 8). Específicamente, se observaron dos agrupaciones claras y una tercera conformada por las representantes sin agrupación evidente (Grupo 1 [en negro]: *C. anthracinus*, *C. plumosos*, *Goeldichironmus* y *Polypedilum*, [todos pertenecientes a la subfamilia Chironominae], Grupo 2 [en celeste]: *Cladopelma* y *Ablabesmyia* [pertenecientes a las subfamilias Chironominae y Tanyponidae] y el Grupo 3, sin una agrupación evidente: *Coelotanypus*, *Endotribelos*, *Glyptotendipes*, Morfo juvenil y *Labrundinia*). Específicamente para el Grupo 1, los representantes *C. anthracinus* (32 ind), *C. plumosus* (2 ind) y *Goeldichironomus* (1 ind), disminuye con relación a la profundidad. Dicho ensamble es reportado en la literatura, como un ensamble que pertenece a concentraciones altas de nutrientes, niveles bajos de oxígeno y niveles de contaminación altos (Armitage et al., 1995). Con respecto al Grupo 2, los géneros *Ablabesmyia* (45 ind), *Coelotanypus* (5 ind) y *Labrundinia* (17 ind) aumentaron en comparación a las demás secciones (intermedia y superficial). Dichos géneros han sido reportados en ambientes con sustratos más granulosos (Spies et al., 2009). Tal y como se describió, son organismos con la capacidad de tolerar mayores concentraciones de nutrientes (Grupo 1) en comparación con organismos representantes de sustratos más granulosos e indicadores de posibles cambios de temperatura (Grupo 2 y 3).

El género *Ablabesmyia* (68 cm; máx: 11 ind), fue el género predominante en el Grupo 2, el cual incrementó su abundancia en la sección más profunda. Así mismo, *Ablabesmyia*, tiene la característica de disminuir en sus abundancias cuando los niveles de productividad primaria incrementan de mesotróficos a eutróficos (Brodersen y Quinlan, 2006). Así mismo, dicho género, cuando se encuentra asociado con los géneros *Coelotanypus* y *Labrundinia* (Grupo 2 y Grupo 3, combinados) ha sido reportado en hábitats con sedimentos granulosos y de aguas estancadas (Spies et al., 2009). Dicho ensamble, observado en la sección profunda

(Figura 7), está conformado por géneros que viven en ambientes más granulosos y a su vez con menores concentraciones de nutrientes, siendo indicadores de que dicha sección presenta las condiciones para un ensamble menos tolerante a concentraciones altas de nutrientes. Estas características permiten interpretar que las condiciones observadas en la sección profunda son diferentes a las demás secciones estudiadas, con relación a las variables no biológicas y biológicas, específicamente referente al ensamble de los organismos de la familia Chironomidae. Los comportamientos observados en la sección profunda, pueden ser comparables a los comportamientos reportados por Vélez et al., (2011), en donde se observan dinámicas biológicas que indican una disminución en los niveles del agua del lago de Amatitlán y cambios en las concentraciones de los nutrientes, como consecuencia de siglos de agricultura extensiva. Así mismo, Ellenberg (2014) describe el tipo de sedimento para el lado este como granuloso y de partículas grandes, y sus concentraciones de C y NT, más altos para el lado este, comparado con el lado oeste.

El cambio en el perfil vertical de sedimento del lado este, específicamente en la sección más profunda, evidenció los valores más altos en la relación de C:N:F (66, 54 y 78 cm; máx. 1107, 579.5 y 525, respectivamente) y a su vez los valores más bajos (72 y 74 cm; min. 107 y 80.1 respectivamente). Las variaciones observadas respondieron, mayormente, a las concentraciones de C cuantificadas en los sedimentos. Las concentraciones altas de C observadas en la sección profunda, pueden tener dos posibles orígenes: de tipo autóctono, provenientes de dinámicas internas del lago, como, por ejemplo, biológicas (florecimientos algales, comunidades de macrófitas [*Eichornia crassipies*, *Elodea sp.*, y otras]); y de tipo alóctono, provenientes de dinámicas externas del lago, como por ejemplo, eventos naturales o climatológicos (huracanes, épocas lluviosa y seca, etc.), que dependiendo de la temporada presentan un aporte considerable de sedimentos. Algunos eventos naturales documentados que pudieron causar incrementos las concentraciones de C para el lago de Amatitlán, son: el huracán Francia (1969), el terremoto de San Gilberto (1976), el huracán Mitch (1998), la tormenta Stan (2005), y una de las tormentas reportadas en los estudios de sedimento realizados por Michaels, et al. (2014), la tormenta de Agatha y la erupción del volcán Pacaya (2010). En este último, hubo un arrastre de arena, rocas, ramas, basura e incluso vehículos de la vía pública (Consejo Municipal de Desarrollo del Municipio de Amatitlán, Guatemala y Secretaría planificación y Programación de la Presidencia, 2011) (Fajardo, 2010). Estos eventos

históricos, son registrados por instituciones responsables en temas ambientales y climatológicos como el INSIVUMEH. El presente estudio es una recopilación de información de los perfiles de sedimento, que pueden ser reportados como archivos históricos. Siendo un aporte valioso al ser el primer esfuerzo para evaluar el potencial de los quironómidos como bioindicadores de eutrofización cultural. En especial, para la sección profunda en donde observamos cambios en las agrupaciones de organismos de la familia Chironomidae, documentando una transición del grupo 1 al grupo 2 y 3, reflejando indicadores de los cambios en los niveles de la productividad primaria.

A través de los resultados presentados durante la presente investigación se puede interpretar que el perfil de sedimento del lado este del lago de Amatitlán, es un registro histórico que documenta cambios ambientales, específicamente en relación a la productividad primaria y las concentraciones de nutrientes en el lago de Amatitlán. En el cual, se observó un cambio gradual a lo largo del perfil desde la sección profunda a la superficial. Específicamente, para la sección profunda se observa una mayor abundancia de los organismos de los Grupos 2 y 3, los cuales son organismos indicadores de sedimentos con menores niveles de productividad primaria y menores concentraciones de nutrientes, permitiendo interpretar, que dicha sección presenta condiciones menos eutróficas. En el caso de la sección intermedia, se observa que las abundancias del Grupo 2 y 3 empiezan a disminuir y con eso, incrementar las abundancias del Grupo 1, evidenciando que los valores de productividad primaria y concentración de nutrientes empiezan a incrementar. Seguidamente, en la sección superficial se observa que predomina el Grupo 1, el cual está conformado por organismos indicadores de mayores niveles de productividad primaria y concentraciones de nutrientes, que permiten interpretar que dicha sección presenta condiciones eutróficas en transición a hipereutrófica. Evidenciando cambios en la productividad primaria de la sección profunda, seguida de una sección intermedia con incremento de productividad, hasta la sección superficial con los valores más altos de productividad.

### 9.3 Propuesta de bioindicadores para el estudio de la eutrofización cultural del Lago de Amatitlán

Con el objetivo de evaluar el potencial de los bioindicadores de la eutrofización cultural reportados para el presente estudio, los organismos considerados para su clasificación como

bioindicadores de eutrofización cultural fueron seleccionados según dos criterios: (a) el número de individuos reportados (mayor o igual a 4 ind), (b) características reportadas en la literatura. El resultado de esto se observa en la Tabla 6. Los organismos a los cuales se le aplicó la matriz fueron las especies: *C. anthracinus* y *C. plumosus*, seguidos por los géneros: *Glyptotendypes*, *Goeldichironomus*, *Ablabesmyia*, *Coelotanypus* y *Labrundinia*; en total 2 especies y 5 géneros fueron ponderados. Las especies y géneros que completaron el requisito de presentar valores mayores a 6 en la matriz ponderada fueron: *C. anthracinus* y *C. plumosus*; y los géneros *Goeldichironomus*, *Ablabesmyia* y *Labrundinia*.

En la revisión de literatura realizada las especies de *C. anthracinus* y *C. plumosus*, se encontró que son organismos indicadores de niveles altos de productividad primaria, que a su vez están relacionados a los niveles altos de materia orgánica y los valores del C, representando su fuente principal de alimento, además han sido reportados en ambientes con niveles de oxígeno bajos o casi nulos (característica 1, 2 y 4, Tabla 6) (Armitage et al., 1995). Estas dos especies son reconocidas en la literatura por sus características taxonómicas distintivas a nivel de organismos vivos y en los sedimentos a través del uso de las cápsulas cefálicas, específicamente el mentum. Sumado a esto, presentan la característica de preservarse bien en los sedimentos, por lo que es posible diferenciarlos taxonómicamente. Estas dos especies han sido utilizadas en la ecotoxicología para evaluar las resistencias a diferentes contaminantes, siendo ejemplares bastantes tolerantes durante su ciclo de vida (característica 3, 6 y 7, Tabla 6) (Airas, Leppänen, y Kukkonen, 2008; Di Veroli et al., 2014; Meregalli, Vermeulen, Ollevier, 2000; Rosenberg, 1992). Una de las características del potencial de indicación de los cambios ambientales de *C. anthracinus* y *C. plumosus*, es que no presentan una respuesta inmediata a estos cambios, en gran parte se debe a que son bastantes tolerantes a la eutrofización o a bajos niveles de oxígeno (Laprida et al., 2014; Pérez et al., 2013). A pesar de eso, la puntuación de ambas especies fue de 6 en la matriz ponderada (Tabla 6), por lo que cumplen con el criterio de ser potenciales bioindicadores de la eutrofización cultural del lago de Amatitlán.

El género *Goeldichironomus*, presentó sus mayores abundancias en las secciones superficiales de ambos perfiles de sedimento, se puede interpretar que dicho género es reciente en la historia de eutrofización cultural del lago de Amatitlán (Figuras 6 y 7). Así

mismo, no ha sido reportado previamente para el lago de Amatitlán. Entre sus características encontramos que son buenos bioindicadores de ambientes perturbados, específicamente de ambientes eutróficos e hipereutróficos por causas antropogénicas (características 1, 2 y 4, Tabla 6) (Arriola, 2012; Pérez et al., 2017; Harmelik et al., 2018; Laprida et al., 2014; Sublette y Sasa, 1994). Con relación a su taxonomía, en una entrevista realizada a Pratt, N. (2019), especialista en taxonomía de quironómidos, recomendó que para identificar el género *Goeldichironomus* a nivel de especie, es necesario tener estructuras del cuerpo de la larva, las cuales no se conservan en el sedimento a través del tiempo (características 3, 5 y 6, Tabla 6), por lo que no cumple tal requisito en la matriz. Aun así, la puntuación de *Goeldichironomus* fue de 6 en la matriz ponderada (Tabla 6), es decir, cumple con el criterio de ser potencial bioindicador de la eutrofización cultural del lago de Amatitlán.

El género *Ablabesmyia* tiene la característica de ser sensible a los cambios ambientales, específicamente aquellos que están ligados a los niveles altos de productividad, es decir que sus abundancias disminuyen cuando incrementa la productividad primaria (características 1, 2, 3, 4 y 5, Tabla 6) (Brodersen y Quinlan, 2006). La puntuación de *Ablabesmyia* fue de 6 en la matriz ponderada (Tabla 6), es decir, cumple con las características para ser bioindicador de la eutrofización cultural del lago de Amatitlán. En el caso del género *Glyptotendypes*, ha sido reportado como especie tolerante a concentraciones bajas de oxígeno y a su vez asociado también a macrófitas sumergidas (características 1, 2 y 3) (Brook, Bennion, y Birks, 2001; Little y Smol, 2001). En condiciones especiales dicho género en combinación con *Ablabesmyia*, han sido reportados en lagos eutróficos o poco profundos; en el mismo estudio se reporta que al incrementar la productividad del sistema, se observa la disminución de las abundancias del género *Ablabesmyia* y a su vez se documenta el incremento del género *Glyptotendypes* y la especie *C. plumosus* (Broedersen y Quinlan, 2006). Lo que puede ser un indicador de que *Glyptotendypes* es más tolerante a los cambios ambientales (característica 1 y 2, Tabla 6). Las características taxonómicas de especialización de hábitat y abundancia del género *Glyptotendypes*, según la literatura reportada en Guatemala, se desconocen o conoce muy poco (características 4, 5 y 6, Tabla 6) (Pérez et al., 2016). Por lo que la puntuación de *Glyptotendypes* fue de 3 en la matriz ponderada (Tabla 6), es decir, no cumple con el criterio de ser potencial bioindicador de la eutrofización cultural del lago de Amatitlán.



El género *Coelotanypus* es reportado en la literatura como indicador de aguas estancadas, con preferencia de hábitat en del fondo en pantanos, estanques con sedimentos suaves y las porciones más lentas de arroyos y ríos (características 1, 2, 3, 4, Tabla 6) (Morrisey, 1950; Spies et al., 2009). Su taxonomía y sus abundancias son poco conocidas en Guatemala (características 5 y 6, Tabla 6). La puntuación de *Coelotanypus* fue de 5 en la matriz ponderada (Tabla 6), es decir, no cumple con las características para ser bioindicador de la eutrofización cultural del lago de Amatitlán. En el caso del género *Labrundinia*, presenta la característica de ser buen bioindicador de los cambios ambientales, ya que en estudios previos ha sido utilizado como un género indicador de los cambios de temperatura (característica 1, 2 y 4, Tabla 6) (De lima et al., 2013; Wu et al., 2014). En el estudio de Spies y otros, (2009) los ensambles de *Labrundinia* asociados a *Goeldichironomus*, *Coelotanypus* y *Ablabesmyia*, son utilizados para indicar cambios ambientales en especial, los relacionados a los cambios de las concentraciones de nutrientes. A su vez, son reportados en sustratos más granulosos y de aguas más estancadas (características 3, 4 y 6, Tabla 6) (Spies et al., 2009). La puntuación de *Labrundinia* fue de 8 en la matriz ponderada (Tabla 6), es decir, cumple con el criterio de ser potencial bioindicador de la eutrofización cultural del lago de Amatitlán.

La eutrofización cultural es un problema que afecta las diferentes comunidades biológicas que viven en el lago de Amatitlán. A través del presente estudio, se logró determinar que el uso los organismos de la familia Chironomidae en combinación con variables no biológicas, nos permiten conocer de mejor manera los impactos de la eutrofización cultural en las dinámicas biológicas en el sedimento. Los grandes hallazgos de la presente investigación es reportar Tanypodinae y Chironominae, dos subfamilias de la familia Chironomidae, de las cuales, los géneros *Ablabesmyia*, *Labrundinia* pertenecientes a la subfamilia Tanypodinae y el género *Goeldichironomus*; y las especies *C. anthracinus* y *C. plumosus* pertenecientes a la subfamilia Chironominae, presentan potencial de indicar los cambios en el estado trófico para ambos lados (oeste y este) a través del tiempo en el lago de Amatitlán.

Basados en una comunidad biológica de organismos con bajas abundancias, podemos inferir que el origen de la contaminación es de tipo antropogénico en el caso de Amatitlán. Por lo que se recomienda implementar medidas de restauración ecológica en el presente y a largo plazo de forma inmediata y estratégica, que puedan tener efectos positivos en el ecosistema

y ensambles de quironómidos. Conocer la historia de contaminación y estado actual del Lago de Amatitlán, permite realizar planes de manejo integral que permitan tomar acciones que mitiguen la contaminación y contrarresten su eutrofización cultural/inducida.

## 10. CONCLUSIONES

- Los organismos de la familia Chironomidae evidenciaron diferencias en las riquezas y abundancias, según su ubicación geográfica en el lago de Amatitlán. En el lado oeste del lago, se observaron menores abundancias (20 ind) y riquezas (2 géneros: *Ablabesmyia* y *Goeldichironomus* y 1 especie: *C. anthracinus*). En contraste el lado este, donde se evidenció mayores abundancias (428 ind) y riquezas (8 géneros: *Ablabesmyia*, *Coelotanypus*, *Cladopelma*, *Endotribelos*, *Goeldichironomus*, *Glyptotedytes*, *Labrundinia* y *Polypedilum* y 2 especies: *C. anthracinus* y *C. plumosus*).
- Las variables biológicas y no biológicas, cuantificadas en los sedimentos verticales correspondientes al lado oeste del lago de Amatitlán, evidenciaron cualitativamente un proceso de eutrofización cultural basado en el aumento de concentraciones de nutrientes a lo largo de las tres secciones de sedimento: superficial (0-16 cm), intermedia (16-66 cm) y profunda (66-84 cm). En la sección superficial, se observaron las mayores concentraciones de C, NT y F (4.1 ppm; 0.62 ppm y 0.08, respectivamente) y menores riquezas, dichos valores, en concordancia con una alta tasa de sedimentación y de posibles florecimientos de cianobacteria, documentan un proceso de eutrofización cultural alto. Seguidamente la sección intermedia evidenció menores concentraciones de NT y F (0.61 ppm y 0.02 ppm), y mayor riqueza, con una disminución en los niveles de contaminación, lo que documenta un proceso de eutrofización cultural menor, en comparación de la sección superficial. Finalmente, la sección profunda evidenció menores concentraciones de NT (0.22 ppm), con riqueza similar a la sección intermedia y un proceso de eutrofización cultural constante. Dicho perfil de sedimento evidencia un proceso gradual de menor eutrofización cultural (sección profunda e intermedia) a un proceso de mayor eutrofización cultural (sección superficial).

- Las variables biológicas y no biológicas, cuantificadas en los sedimentos verticales correspondientes al lado este del lago de Amatitlán, evidenciaron cualitativamente y cuantitativamente ( $p > 0.0200$ ) un proceso de eutrofización cultural basado en el aumento de concentraciones de nutrientes a lo largo de las tres secciones de sedimento: superficial (0-18 cm), intermedia (18-48 cm) y profunda (48-78 cm). En la sección superficial se observaron las mayores concentraciones de C, NT y F (3.68 ppm; 0.96 ppm y 0.11) y en coincidencia con abundancias del Grupo 1 (DCA), grupo con organismos indicadores de altas concentraciones de nutrientes, documentan un proceso de eutrofización cultural alto. La sección intermedia evidenció menores concentraciones de NT y F (1 ppm y 0.56 ppm), y menores abundancias del Grupo 1 y el incremento de las abundancias del Grupo 2 y 3, documentando un proceso de eutrofización cultural menor, en comparación de la sección superficial. Finalmente, la sección profunda evidenció menores concentraciones de C, NT y F (2.1 ppm, 0.11 ppm) y 0.04 ppm), con abundancias del Grupo 2 y 3, indicadores de ambientes menos perturbados y un proceso de eutrofización cultural menor. Dicho perfil de sedimento evidencia un proceso gradual de menor eutrofización cultural (sección profunda e intermedia) a un proceso de mayor eutrofización cultural (sección superficial).
- Las abundancias y las agrupaciones de los organismos de la familia Chironomidae, observadas en el perfil de sedimento correspondiente al lado este del lago de Amatitlán, evidenciaron cambios a lo largo del perfil vertical. En la sección superficial, *C. anthracinus* fue la especie más abundante, seguida del género *Goeldichironomus* y la especie *C. plumosus* indicadoras de altas concentraciones de nutrientes. En la sección intermedia, se observaron las especies *C. anthracinus* y *C. plumosus*, sin embargo, las abundancias del género *Goeldichironomus* disminuyeron. A su vez, incrementaron las abundancias de los géneros *Ablabesmyia*, *Coelotanypus* y *Labrundinia*, indicadores de los cambios en la productividad primaria y tipo de sedimento más granuloso. Por último, en la sección profunda (48-78 cm), los géneros *Ablabesmyia*, *Coelotanypus* y *Labrundinia*, incrementaron en sus abundancias y disminuyeron las abundancias del género *Goeldichironomus* y las especies *C.*

*anthracinus* y *C. plumosus*. Indicando, un cambio en la agrupación de las abundancias desde la sección profunda, seguida de una etapa de transición en la sección intermedia, hasta la sección superficial con los valores más altos de las concentraciones de nutrientes.

- Los organismos de la familia Chironomidae que cumplieron los requisitos para tener potencial como bioindicadores de la eutrofización cultural fueron los géneros *Ablabesmyia*, *Labrundinia*, pertenecientes a la subfamilia Tanypodinae, y el género *Goeldichironomus*; y las especies *C. anthracinus* y *C. plumosus* pertenecientes a la subfamilia Chironominae. A través de la matriz ponderada, propuesta en la presente investigación, es posible proponer eventos y cambios ambientales de importancia para específicamente aquellos eventos que están relacionados con la eutrofización cultural para el Lago de Amatitlán.

## 11. RECOMENDACIONES

- Se recomienda en investigaciones futuras estudiar los caracteres taxonómicos de los organismos de los géneros: *Ablabesmyia*, *Labrundinia* y *Goeldichironomus*, los que presentaron potencial de bioindicación de eutrofización cultural, con el fin de profundizar a un nivel taxonómico más bajo (especie o subespecie) y tener mejor detalle de sus especializaciones de hábitat en el lago de Amatitlán.
- Se recomienda realizar estudios de ecotoxicología a las especies *C. anthracinus* y *C. plumosus*, con el objetivo de conocer los niveles de tolerancia y resistencia a diferentes contaminantes en el agua y sedimento, específicamente aquellos relacionados a la eutrofización cultural en el lago de Amatitlán.
- Se recomienda realizar otros análisis multivariados que permitan evidenciar el grado de asociación de las variables no biológicas y biológicas, así como el tipo de asociación que las variables medidas en este estudio presentan entre sí.
- Se recomienda realizar colectas en el presente de los organismos de la familia Chironomidae, permitiendo generar un listado de las especies, y a su vez combinarlos con los valores de la calidad del agua, que permita realizar una comparación entre el presente y el pasado, ampliando la información del estado trófico del lago de Amatitlán.
- Se recomienda para las variables no biológicas, específicamente para el cálculo de las relaciones de NP y CNP, realizar las sumatorias, incluyendo todas las variaciones de nitrógeno total y fósforo total con el objetivo de tener una imagen más completa del estado trófico del cuerpo de agua.
- La presencia de rocas volcánicas en el sedimento es un registro de la alta actividad volcánica alrededor del lago de Amatitlán, se recomienda para futuros estudios realizar una descripción de la composición de la roca volcánica, para conocer la huella específica que permita relacionarla con alguna erupción volcánica, que permita tener un marcador del tiempo y de la historia.

- Se recomienda implementar medidas de restauración ecológica en el lago de Amatitlán, a corto, mediano y largo plazo, que puedan ser medidas a través de los cambios en los ensambles de quironómidos.
- Realizar un mayor esfuerzo en el análisis de muestras de los sedimentos colectados en los perfiles verticales para corroborar las abundancias de los organismos de la familia Chironomidae reportadas.
- Realizar un estudio de la composición de la roca volcánica encontrada en sedimentos, para saber si tienen alguna huella específica de alguna erupción volcánica que pueda ser un marcador del tiempo y de la historia registrada en los mismos.

## 12. REFERENCIAS

- Airas, S., Leppänen, M., y Kukkonen, J. V. K. (2008). Effects of temperature and oxygen concentration in sediment toxicity testing. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 70(3), 475–482. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2007.06.004>.
- Alba, J., Pardo, I., Prat, N., y Pujante, A. (2005). Metodología para el establecimiento el estado ecológico según la directiva marco del agua. protocolos de muestreo y análisis para invertebrados bentónicos. *Magrama*, 59.
- Alba-Tercedor, J., y Sánchez-Ortega, A. (1986). Un método rápido y simple para evaluar la calidad biológica de las aguas corrientes basado en el de Hellawell (1978). *Limnetica*, 4(1978), 51–56. Doi:10.3145/epi.2008.mar.18 .
- Araneda, A., Cruces, F., Torres, L., Bertrand, S., Fagel, N., Treutler, H. C., Barra, R. y Urrutia, R. (2007). Changes of sub-fossil chironomid assemblages associated with volcanic sediment deposition in an Andean lake (38°S), Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 80(2), 141–156. Doi: 10.4067/S0716-078X2007000200002.
- Armitage, P. D., Patrick D., Cranston, P. S. y Pinder, L. C. V. (1995). *The Chironomidae : Biology and ecology of non-biting midges*. Springer Netherlands.
- Arriola, I. (2012). Índices de calidad de agua en el Rio Pinula, cuenca del lago de Amatitlán. Tesis de licenciatura: USAC.
- Ashe, P., Murray, D. y Reiss, F. (1978). The zoogeographical distribution of Chironomidae (Insecta: Diptera). *Annis Limnologica* 23: 27-60.
- Autoridad para el manejo y desarrollo sustentable del lago de Amatitlán -AMSA- (2015). Calidad de agua de la Cuenca y lago de Amatitlán. División de Control, Calidad Ambiental y Manejo de Lagos. Gobierno de Guatemala, Guatemala. 32pp.
- Basterrechea, M. (1987) Estudios recientes sobre la contaminación del Lago de Amatitlán. Costa Rica: Centro interamericano de documentación e información agrícola.
- Basterrechea, M. y Juárez, Y. (1987) Características fisicoquímicas del lago de Amatitlán. En Basterrechea, M. (1987) Estudios recientes sobre la contaminación del Lago de Amatitlán. Costa Rica: Centro interamericano de documentación e información agrícola.
- Beltran E., Basterrechea, M., Juárez, Y., Cerrato, L. y Molina S., (1985). Causas de la contaminación de 7 ríos tributarios de la subcuenca del lago de Amatitlán. En Basterrechea, M. (1987) Estudios recientes sobre la contaminación del Lago de Amatitlán. Costa Rica: Centro interamericano de documentación e información agrícola.



- Binford, M. W., Brenner, M., Whitmore, T. J., Higuera-Gundy, A., Deevey, E. S. y Leyden, B. (1987). Ecosystems, paleoecology and human disturbance in subtropical and tropical america. *Quaternary Science Reviews*, 6(2), 115–128. Doi: 10.1016/0277-3791(87)90029-1.
- Birks, H. H., y Birks, H. J. B. (2006). Multi-proxy studies in paleolimnology. *Vegetation History and Archaeobotany*, 15(4), 235–251. Doi: 0.1007/s00334-006-0066-6.
- Brenner, M. (1983). *Paleolimnology of the Maya Region*. University of Florida: doctoral thesis. 260pp.
- Brezonik, P. L. y Fox, J. L. (1974). The limnology of selected Guatemalan Lakes. *Hydrobiologia*, 45(4), 467–487. Doi: 10.1007/BF00012032.
- Brodersen, K. y Quinlan, R. (2006). Midges as palaeoindicators of lake productivity, eutrophication and hypolimnetic oxygen. *Elsevier*: 25 (2006) 1995–2012. Doi: :10.1016/j.quascirev.2005.03.020.
- Broederson, K. y Lindergaard, C. (1999). Classification, assessment and trophic reconstruction of Danish Lake using chironomids. *Freshwater biology*: 42, 143-157. Doi: 10.1046/j.1365-2427.1999.00457.x
- Brook, S., Bennion, H. y Birks, J. (2001). Tracing lake trophic history with a chironomid-total phosphorus inference model. *Freshwater biology*: 46, 513±533.
- Calderon, M., Trowbridge, P. y Vanucchi, J. (2010). *Green Movement Against Green Water*. Cornell: College of Agriculture and Life Sciences, Landscape Architecture. 88pp.
- Cano, M. (2018). Diagnóstico de los cuerpos de agua de la cuenca del Lago de Amatitlán. Autoridad para el manejo sustentable de la cuenca y del lago de Amatitlán (AMSA). 60 pp.
- Consejo Municipal de Desarrollo del Municipio de Amatitlán, Guatemala y Secretaría planificación y Programación de la Presidencia. Dirección de Planificación Territorial (2011). *Plan de Desarrollo Amatitlán, Guatemala*.
- Coordinadora Nacional para la Reducción de desastres, CONRED, (2018). Informe erupción volcán fuego. Elaboración: lunes, 6 de agosto de 2018 – No. 146
- Cranston, P. (2010). Chirokey. Recuperado de: <http://chirokey.skullisland.info/references/>.
- Deevey, E. (1957) Limnologic studies in middle America. *The Connecticut academy of Arts and Sciences*: Vol. 39 P. 213-328.
- De Lima, F., Schäfer, A., Lanzer, R. (2013). Diversity and spatial and temporal variation of benthic macroinvertebrates with respect to the trophic state of Lake Figueira in the South of

Brazil. *Acta Limnologica Brasiliense*: vol.25 no.4. Doi: 10.1590/S2179-975X2013000400008.

- Di Veroli, A., Santoro, F., Pallottini, M., Selvaggi, R., Scardazza, F., Cappelletti, D., y Goretti, E. (2014). Deformities of chironomid larvae and heavy metal pollution: From laboratory to field studies. *Chemosphere*, 112, 9–17.
- División de control calidad ambiental y manejo de lagos. (2015). *Calidad de agua de la Cuenca y Lago de Amatitlán*, 32pp.
- Dix, M. (comunicación personal realizada el 8 de mayo 2020).
- Ekdahl, E. J., Teranes, J. L., Guilderson, T. P., Turton, C. L., McAndrews, J. H., Wittkop, C. A. y Stoermer, E. F. (2004). Prehistorical record of cultural eutrophication from Crawford Lake, Canada. *Geology*, 32(9), 745–748. Doi:10.1130/G20496.1.
- Ellenberg, R. (2014). *Limnology of lake Amatitlán in Guatemala and its eutrophication process*. Berlin: Institute of Environmental Engineering. 139pp.
- Epler, J. H. (2001). Identification manual for the larval Chironomidae (Diptera) of North and South Carolina. (D. Lenat, Ed.), EPA. North Carolina. Doi: 10.1016/S0140-6736(00)68158-8.
- Fajardo, O. (2010). *Tierra de los amatles: monografía del municipio de Amatitlán*. Guatemala: Amatitlán es así y es nuestro.com
- Fenn, M., Baron, J., Allen, E.; Rueth, H., Nydick, K., Geiser, L., Bowman, W., Sickman, J., Meixner, T., Johnson, D. y Neitlich, P. (2003). Ecological effects in nitrogen deposition in the Western United States. *BioScience*, 53 (4), 404 – 420.
- Fisher, M. M., Brenner, M. y Reddy, K. R. (1992). A simple, inexpensive piston corer for collecting undisturbed sediment/water interface profiles. *Journal of Paleolimnology*, 7(2), 157–161. Doi: 10.1007/BF00196870.
- Fulan, J. y Anjos, M. (2015). Colonization by Chironomidae larvae in decomposition of *Eichhornia azurea* (Swartz) Kunth in an Amazonian lake in Brazil. *Acta Scientiarum Biological Sciences* 37(4):449-453. DOI: 10.4025/actascibiolsci.v37i4.28238.
- García, H. (2002). Cuantificación de la calidad del agua del río Villalobos en época seca y lluviosa en un período de 24 horas 2 veces al mes en un punto previo a la entrada al Lago de Amatitlán. Guatemala, USAC. 46 pp.
- Gasiorowski, M. y Sienkiewicz, E. (2013). The Sources of Carbon and nitrogen in mountain lakes and the role of human activity in their modification determined by tracking stable isotopes composition. *Water Air Soil Pollution*, 224, 1498 – 1506. Doi:10.1007/s11270-013-1498-0.

- Hamerlik L., da Silva F.L. and Jacobsen D. 2018. Chironomidae (Insecta: Diptera) of Ecuadorian High altitude streams: A Survey and Illustrated Key. *Florida Entomologist*, 101(4): 663-676.
- Heink, U. y Kowarik, I. (2010). What criteria should be used to select biodiversity indicators? *Biodiversity and Conservation*, 19(13), 3769–3797. Doi:10.1007/s10531-010-9926-6.
- Hollert, H., S. Crawford, W. Brack, M. Brinkmann, E. Fischer, K. Hartmann, S. Keiter, R. Ottermanns, J. Ouellet, K. Rinke, M. Rösch, T. Seiler, M. Wessels, M. Hinderer y A. Schwalb. (2018). Looking back – looking forward: a novel multi-time slice weight-of-evidence approach for defining reference conditions to assess the impact of human activities on lake systems. *Science for the Total Environment*, 626: 1036 – 1046. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.113
- Howell, J. (2010). The distribution of phosphorus in sediment and water downstream from a sewage treatment works. *Bioscience Horizons*, 3 (2): 113–123. Doi: 10.1093/biohorizons/hzq015.
- Instituto Nacional de Estadística-INE-. (2014) Caracterización Departamental. Gobierno de Guatemala. 78pp.
- Knedel, W., Chiquin, J., Pérez, J. y Rosales, (1999). Estudio de los niveles de residuos de Plaguicidas en las Ciencias de Amatitlán y del Motagua. Universidad del Valle de Guatemala y Consejo Nacional de Ciencia y tecnología. Guatemala.
- Kopáček, J., Hejzlar, J., Kana, J., Norton, S. y Stuchlík, E. (2015). Effects of acidic deposition on in-lake phosphorus availability: a lesson from lakes recovering from acidification. *Environmental Science yTechnology*, 49 (5), 2895–2903. Doi:10.1021/es5058743
- Langdon, P. G., Ruiz, Z., Brodersen, K. P. y Foster, I. D. L. (2006). Assessing lake eutrophication using chironomids: Understanding the nature of community response in different lake types. *Freshwater Biology*, 51(3), 562–577. Doi: 10.1111/j.1365-2427.2005.01500.x.
- Langdon, P. G., Ruiz, Z., Wynne, S., Sayer, C. D. y Davidson, T. A. (2010). Ecological influences on larval chironomid communities in shallow lakes: Implications for palaeolimnological interpretations. *Freshwater Biology*, 55(3), 531–545. Doi: 10.1111/j.1365-2427.2009.02345.x.
- Laprida, C., Massaferró, J., Mercáu, M. J. R., y Cusminsky, G. (2014). Paleobioindicadores del fin del mundo: Ostrácodos y quironómidos del extremo sur de sudamérica en ambientes lacustres cuaternarios. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, 21(2), 97–117. ISSN 1851-4979.

- Lepori, F. y Keck, F. (2012). Effects of atmospheric nitrogen deposition on remote freshwater ecosystems. *AMBIO*, 41, 235 – 246. Doi: 10.1007/s13280-012-0250-0.
- Little, J. L. y Smol, J. P. (2000). Changes in fossil midge (Chironomidae) assemblages in response to cultural activities in a shallow, polymictic lake. *Journal of Paleolimnology*, 23(2), 207–212. Doi: 10.1023/A:1008005604602.
- Liu, W., Zhang, Q. y Liu, G. (2010). Lake eutrophication associated with geographic location, lake morphology and climate in China. *Hydrobiologia*, 644(1), 289–299. Doi: 10.1007/s10750-010-0151-9.
- Lohse, J., Hamilton, D., Brenner, M., Curtis, J., Inomata, T., Morgan, M., Cardona, K., Aoyama, y Yonenobu, H. (2018). Late holocen volcanic activiy and environmental change in highland Guatemala. *Quaternary Science Reviews*: 191 (2018) 378-392. Doi: 10.1016/j.quascirev.2018.05.014
- Loizeau, J., Span, D., Coppee, V. y Dominik, J. (2001). Evolution of the trophic state of Lake Annency (eastern France) since the last glaciation as indicated by iron, manganese and phosphorus speciation. *Journal of Paleolimnology*, 25, 205 – 214. Doi: 10.1023/A:1008100432461
- Luoto, T. P., Kaukolehto, M., Weckström, J., Korhola, A. y Väiliranta, M. (2014). New evidence of warm early-Holocene summers in subarctic Finland based on an enhanced regional chironomid-based temperature calibration model. *Quaternary Research (United States)*, 81(1), 50–62. Doi: 10.1016/j.yqres.2013.09.010.
- Mackay, A., Battarbee, R.W., Birks, H. y Olfeld, F. (2005). *Global change in the holocene*. Hodder Arnold. London: Routledge. 528 pp.
- Massaferro, J. (2009). Paleoecología: el uso de los quironómidos fósiles (Diptera: Chironomidae) en reconstrucciones paleoambientales durante el Cuaternario en la Patagonia. *Rev. Soc. Entomológica Argentina*, 68(1–2), 209–217. ISSN 0373-5680.
- Massaferro, J y Brooks, S. (2002). Response of chironomids to Late Quaternary environmental change in the Taitao Peninsula, southern Chiel. *Journal of Quaternary Science*, 17 (2), 101 – 111. Doi: 10.1002/jqs.671.
- Massaferro, J., Guevara, S. R., Rizzo, A. y Arribére, M. (2005). Short-term environmental changes in Lake Morenito (41° S, 71° W, Patagonia, Argentina) from the analysis of sub-fossil chironomids. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 15(1), 23–30. Doi: 10.1002/aqc.640.

- Matthews-Bird, F., Gosling, W.,... Brooks, S. (2016). Environmental controls on the distribution and diversity of lentic Chironomidae (Insecta: Diptera) across an altitudinal gradient in tropical South America. *Ecol Evol.* 6(1): 91–112. Doi: 10.1002/ece3.1833
- Meregalli, G., Vermeulen, A. C., y Ollevier, F. (2000). The use of chironomid deformation in an in situ test for sediment toxicity. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 47(3), 231–238. <https://doi.org/10.1006/eesa.2000.1981>
- Michels, A., Lloyd, M., Woeller, R., Dionne, J., Grande, L., Sorto, M., Suarez, A. y Basterrechea, M. (2014) Sedimentation and Life Expectancy of Lake Amatitlán, Guatemala: Increased Vulnerability Under Future Climate Change. En: Filho, W., Alves, F., Caeiro, S. y Azeiteiro, U. (2014) *International Perspective on Climate Change*. Suiza: Springer.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales -MARN- (2017). Informe Ambiental del Estado 2016- Guatemala. Guatemala. 247pp.
- Morrissey, T. (1950). Tanypodinae of Iowa (Diptera). III. The University of Notre Dame: Vol. 1, No. 5 - Vol. 176, No. 2).
- Norton, S., Perry, R., Saros, J., Jacobson, G., Fernandez, I., Kopáček, J., Wilson, T. y SanClements, M. (2011). The controls on phosphorus availability in a Boreal lake ecosystem since deglaciation. *Journal of Paleolimnology*, 46: 107 – 122. Doi: 10.1007/s10933-011-9526-9.
- Noss, R. F. (2011). Indicators for Monitoring Biodiversity : A Hierarchical Approach Essay. *Conservation Biology*, 4(4), 355–364.
- Obrist Farner, J., Brenner, M., Curtis, J., Kenney, W. y Salvinelli, C. (2019) Recent onset of Eutrophication in the Lake Izabal, the largest body in Guatemala. *J. paleolimnol: Vol V*. Doi: 10.1007/s10933-019-00091-3(0123456789(),-volV).
- Oldfield, F. (2005). *Environmental change: key issues and alternative perspectives*. Cambridge University Press. 397 pp.
- Oliva, B. (2001). Estudio paleolimnológico del lago Petén Itzá. Guatemala: Proyecto FODECYT. 112 pp.
- Organización Mundial para la Salud -OMS- (2006). Guía para la calidad del agua potable. Vol.1
- Pace, M., Groffman, P. (1998). *Successes, Limitations and Frontiers in Ecosystem Science*. Millbrook: Springer science. Doi: 10.1007%2Fs100219900010
- Peckham, R. y Dineen, C. (1952). Summer Plankton of Lake Amatitlan, Guatemala. *American Midland Naturalist* 50(2):377. DOI: 10.2307/2422095

- Pérez, L., Bugja, R., Lorenschat, J., Brenner, M., Curtis, J., Hoelzmann, P. y Schwalb, A. (2011). Aquatic ecosystems of the Yucatán Peninsula (Mexico), Belize, and Guatemala. *Hydrobiologia*, 661(1), 407–433. Doi:10.1007/s10750-010-0552-9.
- Pérez, L., Bugja, R., Massafiero, J., Steeb, P., van Geldern, R., Frenzel, P. y Schwalb, A. (2010). Historia ambiental postcolombina del Lago Petén Itzá, Guatemala. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 27(3), 490–507. ISSN 2007-2902..
- Pérez, L., Lorenschat, J., Massafiero, J., Pailles, C., Sylvestre, F., Hollwedel, W., Brandor, G., Brenner, M., Gerald, I., Lozano, M., Scharf, B. y Schwalb, A. (2013). Bioindicators of climate and trophic state in lowland and highland aquatic ecosystems of the Northern Neotropics. *Revista de Biología Tropical*, 61(2), 603–644.
- Pérez, L., Massafiero, J., y Correa-metrio, A. (2017). Paleobioindicadores lacustres neotropicales. Ciudad D.f.: UNAM. 117 pp
- Peters, R. (1986). The role of prediction in limnology. *Limnology and Oceanography*, 31 (5): 1143 – 1159. Doi: 10.4319/lo.1986.31.5.1143.
- Pinder, L. C. V. y F. Reiss. 1983. The larvae of Chironominae (Diptera: Chironomidae) of the Holarctic Region - Keys and diagnoses, p. 293-435. In: T. Wiederholm (ed.). *Chironomidae of the Holarctic region - keys and diagnoses. Part 1 - Larvae*. Motala, Entomologica Scandinavica Supplement 19, 457 p
- Pratt, N. (comunicación personal realizada 23 de Octubre el del 2019).
- Quinlan, R. y Smol, J. P. (2010). Use of subfossil Chaoborus mandibles in models for inferring past hypolimnetic oxygen. *Journal of Paleolimnology*, 44(1), 43–50. Doi: 10.1007/s10933-009-9384-x
- Reavie, E. D., Neill, K. E., Little, J. L. y Smol, J. P. (2006). Cultural eutrophication trends in three southeastern ontario lakes: A paleolimnological perspective. *Lake and Reservoir Management*, 22(1), 44–58. Doi10.1080/07438140609353883.
- Romero-Oliva, C., Contardo-Jara, V., Block, T. y Pflugmacher, S. (2014). Accumulation of microcystin congeners in different aquatic plants and crops a case study from lake Amatitlán, Guatemala. *Ecotoxicology and environmental safety*, 102(2014), 121-128. Doi: 10.1016/j.ecoenv.2014.01.031.
- Romero-Oliva, C., López, N., Aguilar, A. y Santos, F. (2019). Paleoecotoxicología, una herramienta para la reconstrucción del pasado reciente en el Lago de Amatitlán, Guatemala. *Digi, Usac*.
- Rosenberg, D. M. (1992). Freshwater biomonitoring and Chironomidae. *Netherlands Journal of Aquatic Ecology*, 26(2–4), 101–122. <https://doi.org/10.1007/BF02255231>.

- Round, F.E., Crawford, R.M., y Mann, D.G., (1990). *The diatoms: biology y morphology of the genera*. Cambridge University Press. 747 pp.
- Roy, P. D., Caballero, M., Lozano, R. y Smykatz-Kloss, W. (2008). Geochemistry of late quaternary sediments from Tecocomulco lake, central Mexico: Implication to chemical weathering and provenance. *Chemie Der Erde*, 68(4), 383–393. Doi: 10.1016/j.chemer.2008.04.001.
- Ruggiero, M., Gordon, D., Orrell, T., Bailly, N., Bourgoin, T., Brusca, R., Cavalier-Smith, T., Guiry, M., Kirk, P. (2015). A higher Level Classification of All Living Organisms. *PLoS ONE*: 10(4): e0119248. doi:10.1371/journal.pone.0119248.
- Salguero, F. (.2019). Cartografía de cobertura forestal, cartografía hidrográfica, cartografía de uso de suelo, cartografía de puntos de colecta y un análisis geológico del Lago de Amatitlán. Usac: Digi.
- Saulnier-Talbot, É. (2016). Paleolimnology as a Tool to Achieve Environmental Sustainability in the Anthropocene: An Overview. *Geosciences*, 6(2), 26. Doi: 10.3390/geosciences6020026.
- Scaglotii, J. (2014). Los quironómidos fósiles como paleoindicadores de cambios climáticos durante el Tardiglacial y Holoceno en Patagonia. Buenos Aires: Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. 145 pp.
- Schwarzenbach, R., P. Gschwend y D. Imboden (2003). *Environmental Organic Chemistry*. 2a. edición. John Wiley y Sons, Inc., Hoboken. 1026pp.
- Silver, P. A., y J. A. Wozniak (2001). Lead analysis of sediment cores from seven Connecticut lakes, *J. Paleolimnol.*, 26, 1–10.
- Smol, J. P. (1992). Paleolimnology: an important tool for effective ecosystem management. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1(1), 49–58. Doi: 10.1007/BF00044408.
- Solorzano, L. y Sharp, J. (1980a). Determination of total dissolved phosphorus and particulate phosphorus in natural waters. *Limnology and Oceanography*, 24 (4),754-758.Doi: 10.4319/lo.1980.25.4.0754.
- Solorzano, L. y Sharp, J. (1980b). Determination of total dissolved nitrogen in natural waters. *Limnology and Oceanography*, 24 (4),751-754. Doi:10.4319/lo.1980.25.4.0754.
- Spaulding, S., Otu, M., Wolfe, A. y Baron, J. (2015). Paleolimnological records of nitrogen deposition in shallow, high-elevation lakes of Grand Teton National Park, Wyoming, U.S.A. *Artic, Antarctic and Alpine Research*, 47 (4), 703 – 717. Doi: 10.1657/AAAR0015-008.

- Spies, M., Andersen, T., Epler, J., Charles, N. y Watson, J. (2010). Chironomidae (Non-biting midges). En: Brown, B., Borkent, J., Cumming, D., Wood, N., Woodley y. Zumbado. M., Manual of central American diptera. (714 pp). Brasil: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).
- Stoermer, E. F. y Smol, J. P. (2001). The diatoms : applications for the environmental and earth sciences. Cambridge University Press 469 pp.
- Sublette y Sasa, M. (1994). Chironomidae collected in Onchocerciasis endemic areas of Guatemala (Insecta, Diptera). Spixiana supplement: 20, 1-60.
- Urrutia, R., Araneda, A., Torres, L., Cruces, F., Vivero, C. Torrejon, F., Barra, R., Fagel, N. y Shcarf, B. (2010). Late Holocene environmental changes inferred from diatom, chironomid, and pollen assemblages in an Andean lake in Central Chile, Lake Laja (36S). *Hydrobiologia* (2010) 648:207–225. DOI 10.1007/s10750-010-0264-1
- Velez, M. I., Curtis, J. H., Brenner, M., Escobar, J., Leyden, B. W. y Popenoe de Hatch, M. (2011). Environmental and cultural changes in highland Guatemala inferred from Lake Amatitlán sediments. *Geoarchaeology*, 26(3), 346–364. Doi: 10.1002/gea.20352.
- Vollenweider, R.A. 1968 Scientific Fundamentals of the Eutrophication of Lakes and Flowing Waters with Special Reference to Nitrogen and Phosphorus as Factors in Eutrophication. Technical Report DA5/SCI/68.27, Organization for Economic Cooperation and Development, Paris, 250 pp.
- Walker, I. R. y Mathewes, R. W. (1987). Chironomidae (Diptera) and postglacial climate at Marion Lake, British Columbia, Canada. *Quaternary Research*, 27(1), 89–102. Doi: 10.1016/0033-5894(87)90052-4.
- Warwick, W. F. (1980). Chironomidae (Diptera) responses to 2800 years of cultural influence: a paleolimnological study with special reference to sedimentation, eutrophication, and contamination processes. *The Canadian Entomologist*, 112(11), 1193–1238. Doi: 10.4039/Ent1121193-11.
- Wetzel, R.G. (2001). *Limnology Lake and Reservoir Ecosystems*. Academic Press, San Diego.
- Williamson, C. E., Dodds, W., Kratz, T. K. y Palmer, M. A. (2008). Lakes and streams as sentinels of environmental change in terrestrial and atmospheric processes. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6(5), 247–254. Doi: 10.1890/070140.
- Witschey, W. (2016) *Encyclopedia of the ancient Maya*. United States of America: Congress
- Wu J., Porinchu D., Horn S., and Haberyan K. A.. (2014). The modern distribution of chironomid sub-fossils (Insecta: Diptera) in Costa Rica and the development of a regional chironomid-

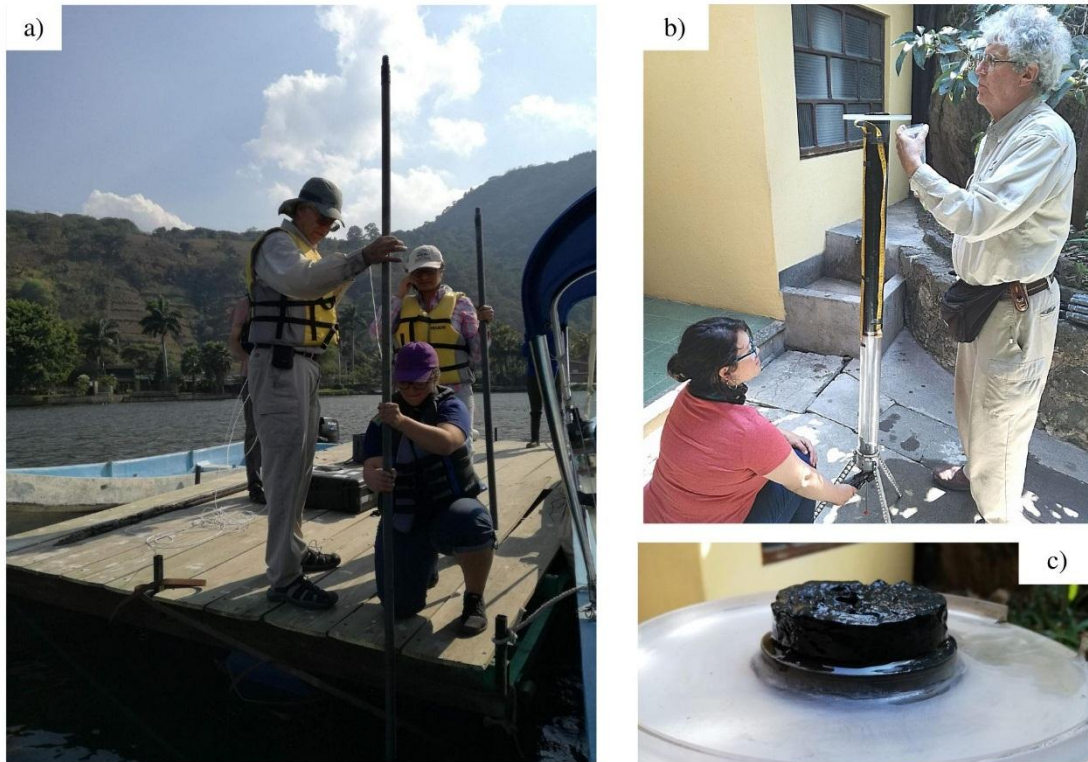


based temperature inference model. *Hydrobiologia* 742:107–127. Doi: 10.1007/s10750-014-1970-x.

- Yalibat, P., y Gándara, I. (1998). *Economía ambiental y desarrollo sostenible: valoración económica del lago de Amatitlán*. Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales: Guatemala.
- Zeng, D. M. (2014). *Using Paleolimnology to Assess the Impacts of Historical Insecticide Use on Chironomid Assemblages in the St. Lawrence River*, Montreal, Quebec, Canada. Queen's University: Undergraduate thesis.
- Zhang, Y. Zhang, H. Zhang, Z. Liu, C. Sun, C. Zhang, W. Marhaba, T. (2018). pH effect on Heavy Metal Release from polluted sediment. *Journal of Chemistry*. Article ID 7597640. Doi: 10.1155/2018/7597640.

### 13. ANEXOS

#### Anexo 1

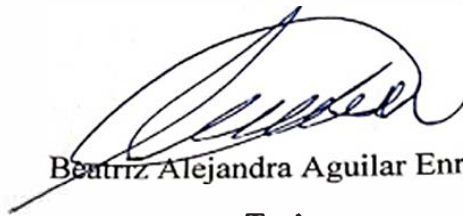


Anexo No.1: a) Colecta de núcleo de sedimentos en el lado oeste del lago de Amatlán. b) Separación de muestras de núcleos de sedimento colectados en el lago de Amatlán. c) Sección de sedimento de 2 cm.

## Anexo 2

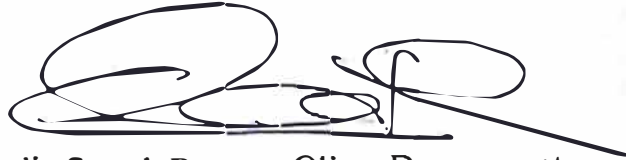


Anexo No.2: a) Pesaje de sedimentos en balanza analítica del LIQA. b) De-floculación de las muestras sedimento colectados en el lago de Amatitlán. c) Identificación de los organismos de la familia Chironomidae, utilizando microscopio en el Laboratorio de Entomología Aplicada -LENAP-. d) Organismos de la familia Chironomidae en muestra de sedimento defloculada.



Beatriz Alejandra Aguilar Enriquez

Tesista



Claudia Suseth Romero Oliva, Dra. rer. nat.

Asesora



Pedro Daniel Pardo Villegas, M.Sc.

Revisor



Sergio Alejandro Melgar Valladares, PhD.

Director



Pablo Ernesto Oliva Soto, M.A.

Decano