



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**Granulometría y composición elemental de los sedimentos de
lagos prístinos e impactados del Parque Nacional “Lagunas de
Montebello”, Chiapas, México**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Licenciado en Ciencias de la Tierra

P R E S E N T A

Hector Coronel Pastrana



DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Javier Alcocer Durand

Ciudad Universitaria, CDMX, 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Hoja de datos del jurado

1. Datos del alumno

Apellido paterno: Coronel

Apellido materno: Pastrana

Nombre(s): Hector

Teléfono

Universidad Nacional Autónoma
de México

Facultad de Ciencias

Carrera

Número de cuenta

2. Datos del tutor

Grado: Doctor

Nombre(s): Javier

Apellido paterno: Alcocer

Apellido materno: Durand

3. Datos del sinodal 1

Grado

Nombre(s)

Apellido paterno

Apellido materno

4. Datos del sinodal 2

Grado

Nombre(s)

Apellido paterno

Apellido materno

5. Datos del sinodal 3

Grado

Nombre(s)

Apellido paterno

Apellido materno

6. Datos del sinodal 4

Grado

Nombre(s)

Apellido paterno

Apellido materno

7. Datos del trabajo escrito

Título

Subtítulo

Número de páginas

Año

Agradecimientos Institucionales

Al Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo Sobre el Agua (CONAGUA-CONACYT) proyecto *“Estudio hidrológico y de calidad del agua del sistema Lagunar de Montebello, en el estado de Chiapas”* y a la DGAPA-PAPIIT proyectos IN219215 *“Factores que determinan el estado trófico de los lagos de Montebello, Chiapas”* eIV200319 *“Área Experimental de Lagos Tropicales”*.

Al Parque Nacional "Lagunas de Montebello", Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) (Jesús A. León y Roberto Castellanos), comunidad local y Comisarios Ejidales de Antelá, Cárdenas, Miguel Hidalgo, Ojo de Agua y Tziscaco por facilitar el acceso a los lagos. Al Comité de Administración de Tziscaco (Sergio Marcos y Miguel A. Tomas), al presidente del Comité de Turismo de Tziscaco (Armando Hernández), Comisario Ejidal de Tziscaco (Enrique M. Hernández), personal del Hotel Villas Tziscaco (Rosemberg F. Jorge, Juan G. Espinoza y Gemuel P. Hernández) por su apoyo y facilidades ofrecidas para el desarrollo de este estudio.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por las instalaciones, espacios, recursos y actividades que me ayudaron a complementar mi desarrollo profesional y personal. Así también por la oportunidad de conocer nuevas culturas por medio de la Escuela Nacional de Lenguas, Lingüística y Traducción, por todos los espectáculos gratuitos como los conciertos en la sala Nezahualcóyotl, funciones de cine y teatro y por las instalaciones deportivas que fortalecieron en mí la cultura y amor por el deporte.

A la Facultad de Ciencias por la infraestructura, los servicios y recursos proporcionados, por el buen acervo que se tiene en la biblioteca, por el equipo de cómputo y por los laboratorios que fueron indispensables en mi formación académica. Así mismo, por las actividades culturales que se llevan a cabo dentro de la facultad.

Agradecimientos Personales

Al Dr. Javier Alcocer Durand por el tiempo, la paciencia y la dedicación con la que, en conjunto, desarrollamos el presente trabajo. Así mismo, por los conocimientos compartidos en el aula y fuera de ella.

A la Dr. Vilma Soledad Ardiles Gloria la paciencia, la confianza y el enorme apoyo que me ha brindado a lo largo del proceso desde las aulas hasta el presente trabajo.

A todo el equipo de trabajo del laboratorio tanto el de Biodiversidad y Macroecología, en el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, como al de la FES Iztacala, por la confianza, el trato amable y cordial que recibí al momento de desarrollar los análisis del presente trabajo.

Al Dr. Oscar Escolero Fuentes y a la Mtra. Selene Olea Olea por el apoyo y por brindarme conocimientos fuera de clases.

A mi familia, por el enorme apoyo y amor en cada momento a lo largo de toda la vida y sobre todo por nunca dejar de creer en mi.

A mi novia Susana y a su familia entera, por apoyarme, recibirme numerosas veces y brindarme un cálido y afectuoso lugar para desarrollar el presente trabajo.

A mis amigos, por su tiempo, confianza, por todos los buenos momentos vividos a su lado. En especial a Pawiwis (†), por acompañarme a lo largo de la carrera, por ser mi equipo y estar codo a codo en cada materia, en cada reto que se nos presentó.

Dedicatoria

El presente trabajo va dedicado a todas las personas que creyeron en mi, en especial a aquellas que me acompañaron en todo el proceso, que en innumerables ocasiones me dieron palabras de ánimo para redoblar esfuerzos.

Así mismo espero, con mi trabajo, incentivar y motivar a mis compañeros para realizar estudios limnológicos con el fin de conocer más de estos, como funcionan para poder, a corto, mediano y largo plazo, presentar propuestas de remediación, restauración y control de los cuerpos de agua en el país.

Índice

	Págs.
Resumen	
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
3. Justificación	6
4. Hipótesis	6
5. Objetivos	7
5.1 Objetivo general	7
5.2 Objetivos particulares	7
6. Área de estudio	7
7. Materiales y métodos	10
7.1 Trabajo de campo	10
7.2 Trabajo de laboratorio	12
7.3 Trabajo de gabinete	14
8. Resultados	19
8.1 Parámetros fisicoquímicos del agua de fondo	19
8.2 Granulometría y parámetros texturales	24
8.3 Materia orgánica y carbonatos en los sedimentos	35
8.4 Carbono, nitrógeno y azufre elemental en los sedimentos	38
8.5 Comparación entre los lagos	48
9. Discusión	54
10. Conclusiones	61
11. Literatura citada	63

Índice de Tablas

Tabla		Págs.
Tabla 1.	Ubicación geográfica, características y clasificación descritas en Alcocer <i>et al</i> , (2016).	11
Tabla 2.	Mínimos, máximos, promedios y desviaciones estándar de los parámetros fisicoquímicos del agua de fondo de los lagos en estudio.	20
Tabla 3.	Matriz de las correlaciones estimadas a partir de la solución factorial entre los componentes principales (CP1FQ, CP2FQ y CP3FQ) de los parámetros fisicoquímicos.	23
Tabla 4.	Clasificación textural de los sedimentos de los lagos muestreados en PNLM.	25
Tabla 5.	Clasificación del tamaño medio ($Mz\Phi$) de los sedimentos de los lagos muestreados en PNLM.	27
Tabla 6.	Clasificación de la moda (en mm y en Φ) de los sedimentos de los lagos muestreados en PNLM.	28
Tabla 7.	Clasificación de la selección ($\sigma\Phi$) de los sedimentos de los lagos muestreados en PNLM.	29
Tabla 8.	Clasificación de asimetría (S_{kl}) de los sedimentos de los lagos muestreados en PNLM.	30
Tabla 9.	Kurtosis (KG) y clasificación de agudeza de los sedimentos de los lagos muestreados en PNLM.	31
Tabla 10.	Matriz de las correlaciones estimadas a partir de la solución factorial entre los componentes principales (CP1PG y CP2PG) de los parámetros granulométricos.	33
Tabla 11.	Porcentaje promedio y desviación estándar del contenido de materia orgánica (MO) y de carbonatos (CO_3) en los sedimentos de los lagos muestreados del PNLM.	35
Tabla 12.	Contenido de porcentaje promedio de carbono (C%), nitrógeno (N%) y azufre (S%) elementales de los sedimentos de los lagos en estudio del PNLM.	38
Tabla 13.	Matriz de las correlaciones estimadas a partir de la solución factorial entre los componentes principales (CP1C, CP2C y CP3C).	42
Tabla 14.	Relación C/N para los grupos generados por el análisis de cúmulos y su origen potencial.	43

Tabla 15.	Tabla con resultados de análisis de cúmulos con clasificaciones a color.	49
Tabla 16.	Texturas de sedimentos de lagos kársticos.	55
Tabla 17.	Concentración de MO y CO ₃ sedimentarios en lagos kárstico.	58
Tabla 18.	Contenido de C, N y S elemental de lagos kársticos.	60

Índice de Figuras

Figura		Pág.
Fig. 1	Mapa de los lagos del PNLM.	10
Fig. 2	Muestras secas de sedimentos de todos los lagos en estudio previas al acidulado.	13
Fig. 3	Acidulado de las muestras de sedimentos.	13
Fig. 4	Muestras para enjuagar después de alcanzar un pH de 2.	13
Fig. 5	Procesamiento de muestras de sedimentos.	14
Fig. 6	Dendrograma de clasificación de los lagos del PNLM con base en los parámetros fisicoquímicos del agua de fondo y valores de clorofila-a tomados de Vera-Franco <i>et al</i> , (2015).	22
Fig. 7	Distribución de lagos en estudio con respecto a los componentes principales CP1FQ (eje X) y CP2FQ (eje Y).	24
Fig. 8	Diagrama triangular de texturas de Shepard con los lagos muestreados del PNLM.	26
Fig. 9	Dendrograma de los parámetros granulométricos de los sedimentos de los lagos en estudio del PNLM.	33
Fig. 10	Distribución de lagos en estudio con respecto a los componentes principales CP1PG (eje X) y CP2PG (eje Y).	35
Fig. 11	Porcentaje promedio (± 1 d.e.) de materia orgánica en los sedimentos de los lagos en estudio.	37
Fig. 12	Porcentaje de carbonatos en los sedimentos de los lagos en estudio.	37
Fig. 13	Porcentaje promedio (± 1 d.e.) de C elemental en los sedimentos de los lagos en estudio del PNLM.	39
Fig. 14	Porcentaje promedio (± 1 d.e.) de N elemental en los sedimentos de los lagos en estudio.	40
Fig. 15	Porcentaje promedio (± 1 d.e.) de S elemental en los sedimentos de los lagos en estudio.	40
Fig. 16	Dendrograma de contenido de materia orgánica, carbonatos, C elemental, N elemental y S elemental en los sedimentos de los lagos en estudio del PNLM.	41

Fig. 17	Distribución de lagos en estudio con respecto a los componentes principales CP1C (eje X) y CP3C (eje Y).	43
Fig. 18	Comparación entre el contenido de CO ₃ y profundidad media de los grupos obtenidos en el dendrograma de MO, CO ₃ y análisis elemental.	44
Fig. 19	Comparación entre el contenido de MO y profundidad media de los grupos obtenidos en el dendrograma de MO, CO ₃ y análisis elemental.	45
Fig. 20	Comparación entre el contenido de C elemental y profundidad media de los grupos obtenidos en el dendrograma de MO, CO ₃ y análisis elemental.	46
Fig. 21	Comparación entre el contenido de N elemental y profundidad media de los grupos obtenidos en el dendrograma de MO, CO ₃ y análisis elemental.	47
Fig. 22	Comparación entre el contenido de S elemental y profundidad media de los grupos obtenidos en el dendrograma de MO, CO ₃ y análisis elemental.	48
Fig. 23	Visualización espacial de la ubicación de los lagos en estudio.	49
Fig. 24	Visualización espacial de la ubicación de los grupos formados por el dendrograma de parámetros fisicoquímicos.	51
Fig. 25	Visualización espacial de la ubicación de los grupos formados por el dendrograma de parámetros granulométricos.	52
Fig. 26	Visualización espacial de la ubicación de los grupos formados por el dendrograma de MO, CO ₃ y análisis elemental.	53

Resumen

El Sitio Ramsar y Parque Nacional "Lagunas de Montebello" (PNLM) proporciona bienes y servicios ecológicos, representa una importante reserva hidrológica y forestal y constituye uno de los paisajes más bellos del país principalmente por su complejo lacustre de origen kárstico. A partir de 2003 se han ido presentando serias afectaciones a los cuerpos acuáticos las que han ocasionado la preocupación y estudio por parte de dependencias gubernamentales. Esta afectación va desde cambios en la coloración del agua de los lagos de cristalina a amarilla verdosa, la presencia de natas blancas, olores desagradables y mortandad de peces. El presente trabajo presenta las características de los sedimentos de 16 lagos del complejo lacustre, los cuales conjuntan a un grupo de lagos diversos (impactados y no impactados, someros y profundos, de planicie y de montaña). Se describen las principales variables texturales, las concentraciones de materia orgánica (MO) y carbonatos (CO_3) y el contenido de C, N y S elemental. El sedimento se muestreó utilizando una draga tipo Ekman (15x15x15 cm). De cada muestra se tomaron manualmente dos núcleos, el primero para el análisis textural, de MO y CO_3 y el segundo para el análisis de C, N y S elemental. Los parámetros fisicoquímicos del agua de fondo (temperatura, oxígeno disuelto, porcentaje de saturación, pH, conductividad, potencial redox y turbidez) se obtuvieron de la base de datos del proyecto del GILT-FES Iztacala.

Se realizaron análisis de cúmulos y de componentes principales con base en los parámetros fisicoquímicos de agua de fondo, parámetros granulométricos y de MO, CO_3 y C, N y S elemental. Se obtuvieron 3 grupos en cada análisis de cúmulos y se identificaron las variables con mayor peso para generar cada agrupación.

Para los parámetros fisicoquímicos, los valores de turbidez, oxígeno disuelto y porcentaje de saturación permitieron diferenciar entre los lagos de planicie y los de montaña; lo anterior asociado al aporte de sales disueltas proveniente de la descarga del río Grande y

drenaje agrícola, así como al consumo de oxígeno por procesos de remineralización de la materia orgánica.

Por otro lado, la textura, tamaño medio y kurtosis permitieron identificar 3 grupos de lagos. Estos grupos se ubican en 3 secciones de la zona de estudio (noroeste, central y sureste), así mismo se identificó que el tamaño de grano va aumentando en dirección NW-SE y que, tanto en la región noroeste como en la sureste, existe aporte de 2 o más fuentes de sedimento.

El contenido de MO y C, N y S elemental también clasificaron a los lagos en 3 grupos. En general, los lagos de montaña contienen una mayor cantidad de MO, C y N elemental que los lagos de planicie (a excepción de los lagos con fondos anóxicos) asociada a la entrada de MO alóctona; la proporción C/N en los lagos de planicie impactados indica la predominancia de MO de origen autóctono y mixto (autóctono y alóctono), mientras que se distingue una separación de los lagos de montaña en: a) parte central de la zona de estudio donde predomina el origen autóctono y b) parte sureste donde predomina el origen mixto (autóctono y alóctono). El contenido de S elemental es mayor en los lagos de planicie que en los lagos de montaña.

Por su condición particular de ser meromíctico, Dos Lagos un lago no impactado de montaña se agrupó con los lagos de planicie (impactados) en todos los análisis de cúmulos.

Los lagos de planicie (impactados) alimentados principalmente por aguas superficiales y los de montaña (no impactados) alimentados por aguas subterráneas presentan diferencias en las características del agua de fondo y el contenido en sedimento; sin embargo, los lagos de planicie como de montaña ubicados en la zona de transición presentan características híbridas que indica la afectación por las actividades antrópicas, lo cual hace evidente el avance del deterioro de los lagos en Montebello y con ello la necesidad de mayor estudio y planes de conservación del lugar.

1. Introducción

Los cuerpos de agua dulce son de suma importancia para la vida, particularmente para los seres humanos, ya que es la única fuente de agua que se puede utilizar para beber, regar y de manera general, satisfacer diferentes necesidades. Poseen una alta biodiversidad, valor estético y recreativo. Los lagos también son importantes porque son sistemas muy sensibles a cambios en su entorno, como pueden ser cambios en el clima, en la red de drenaje, en la cubierta vegetal de su cuenca de captación, entre otros. Además, son sensibles a cambios internos que se registran como variaciones en las propiedades fisicoquímicas del agua (Caballero, 2003).

El clima ejerce una influencia notable en los procesos lacustres ya que la persistencia de un lago es posible solo si el agua que llega a él y procedente de diversas fuentes (lluvia, aporte superficial y/o subterráneo) excede a las pérdidas (efluentes y evaporación). Los procesos sedimentarios que ocurren dentro del lago favorecen que en su fondo se acumule sedimento e influya sobre la calidad del agua de estos. Debido a las diferencias en las características de la cuenca de captación (geología, uso de suelo, vegetación) y las variables sedimentarias, las propiedades fisicoquímicas del agua de los lagos pueden variar, haciendo que existan lagos con características diferentes que, a su vez, dependen de factores climatológicos, estación del año, vientos y de la dinámica de las condiciones de fondo (Williams *et al.*, 1993).

Los sedimentos que se acumulan en el fondo de un lago son reflejo de la interacción entre los factores bióticos y abióticos que inciden tanto en el lago como en su cuenca de captación (Eugster y Kelts, 1983). De manera general, se pueden separar dos componentes principales de los sedimentos lacustres, los autóctonos o autigénicos, originados dentro del lago mismo y los componentes alóctonos o alogénicos, provenientes de la cuenca de captación. El material autigénico está dominado por productos derivados de la actividad biológica dentro del lago, como materia orgánica y restos de organismos que pueden ser de naturaleza silíceo, calcáreo y quitinoso, entre otros. Los sedimentos autigénicos también pueden ser de origen inorgánico, al precipitar en la columna de agua algunas sales, o minerales, como los carbonatos. Por otro lado, los sedimentos alogénicos llegan al lago ya sea por transporte fluvial o eólico y están constituidos, principalmente, por

sedimentos clásticos, provenientes de la erosión de la cuenca de captación, aunque también pueden incluir materia orgánica de diferente tipo, como restos de hojas y tallos, granos de polen, etc. Los sedimentos alogénicos también pueden incluir algunas sales provenientes de la disolución de las rocas o suelos circundantes (Anadon, 1992; Folk y Ward, 1957).

Dependiendo del balance entre los diversos tipos de materiales que se depositan en el lago, tanto autigénicos como alogénicos, estos se pueden clasificar en cuatro tipos diferentes : 1) sedimentos clásticos, que se originan en lagos donde dominan los aportes externos (alogénicos) de material clástico o terrígeno, 2) sedimentos de origen químico (carbonatos, sales), típicos de lagos donde predominan los procesos autigénicos de precipitación de sales, 3) sedimentos bioquímicos, en los que dominan partículas producto de la actividad fisiológica de los organismos que viven en el lago (autigénicos), como restos silíceos (de algas o diatomeas) o carbonatados (conchas de ostrácodos, gasterópodos, etc.) y 4) sedimentos orgánicos, constituidos principalmente por materia orgánica proveniente de los organismos que viven en el lago, aunque parte de ella, también puede provenir de los suelos y vegetación del entorno (Anadon, 1992).

Para obtener información relacionada con el origen y transporte de los sedimentos es necesario caracterizarlos mediante el tamaño de grano, su forma, composición elemental y características texturales, mediante el uso de parámetros granulométricos o estadísticos (moda, media, mediana, asimetría, kurtosis) (González *et al.*, 2012); además, estos parámetros granulométricos permiten analizar las propiedades mecánicas de los sedimentos y entender la dinámica en los ambientes de depósito (Folk y Ward, 1957).

Los ecosistemas acuáticos de México son de gran importancia para la vida silvestre, la biodiversidad y el ecoturismo nacional. Son esenciales para las diversas actividades humanas, incluidas la ganadería, el desarrollo industrial, urbano y las economías locales. Sin embargo, en las aguas continentales el principal problema es la sobreexplotación de este recurso, ocasionando la disminución del líquido disponible para uso urbano, agrícola, además de la contaminación, eutrofización e introducción de especies exóticas que han deteriorado estos sistemas (Lara *et al.*, 2008).

El Parque Nacional “Lagunas de Montebello” (PNLM) representa una importante reserva forestal e hidrológica. La cuenca del Río Grande de Comitán está conformada por el afluente principal Río Grande, el cual es alimentado por el lago Juznajib en la parte alta de la cuenca y que, en su recorrido, atraviesa zonas urbanas y agrícolas hasta desembocar en el sistema lacustre conocido como “Lagunas de Montebello”, siendo declarado área natural protegida el 16 de diciembre de 1959 por decreto publicado en el Diario Oficial de la Federación (CONANP-SEMARNAT, 2007).

A pesar de que fue declarado Sitio Ramsar en el 2003, el PNLM ha ido presentando serias afectaciones. Desde el año 2003, se reportó en la laguna Vuelta de Agua, cambio en la coloración del agua de cristalina a amarillo-verdosa y la presencia de natas blancas-amarillentas en la orilla de la laguna (CFE, 2012). Este fenómeno se ha extendido a otras lagunas cercanas, por lo cual, ha ocasionado la preocupación y estudio por parte de dependencias gubernamentales (CONANP-RAMSAR, 2003).

Entre las afectaciones que se han presentado en el PNLM están la introducción de especies exóticas (carpa, tilapia y lobina), la contaminación del agua, la acumulación de desechos no orgánicos productos de la actividad turística (basura) y la presión sobre el recurso agua para el uso doméstico y agrícola. La contaminación del suelo tiene origen en las actividades agropecuarias, uso de fertilizantes y plaguicidas, así como en el vertido de las aguas residuales domésticas de la ciudad de Comitán de Domínguez al Río Grande y su desembocadura en el lago Tepancoapan, el más extenso del Sistema de Lagos de Montebello (CONANP-SEMARNAT, 2007).

2. Antecedentes

En el 2012, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) realizó estudios en las Lagunas Vuelta de Agua, Balantetik, Chajchaj y San Lorenzo y registró mediciones de factores fisicoquímicos, tales como conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, potencial redox y

análisis elemental a lo largo de toda la columna de agua, determinando una estratificación del agua en las lagunas Vuelta de Agua y San Lorenzo a partir de los 6 m de profundidad, en promedio, con condiciones reductoras, mientras que se presentaron con condiciones aerobias de 0 a 6 m de profundidad, en promedio. También se encontró la presencia de sulfuros, asociado a fenómenos de descomposición de materia orgánica, los cuales se consideran nocivos para la fauna acuática local.

Juárez (2014) realizó un análisis hidrogeoquímico de la cuenca del Río Grande de Comitán para conocer las propiedades fisicoquímicas del agua (color, tipo, cantidad de solutos, pH, temperatura, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto) concluyendo que existe una alteración de la composición química del agua debido a un aporte anormal de cloro por aguas residuales provenientes de los poblados de La Independencia, Emiliano Zapata, El Triunfo y la zona cercana a la carretera Trinitaria-Palenque. También concluyó que las concentraciones de sulfato en el sureste de la cuenca se deben a aguas residuales mientras que las aguas con mayor concentración de nitrato están relacionadas con las zonas de cultivo.

Navarro-Mora (2014) evaluó la presencia de sulfuros en el agua del lago Chajchaj concluyendo que las concentraciones de sulfuro en la superficie eran casi nulas, esto debido al movimiento del agua e interacciones con el medio que permiten la mezcla de los componentes, existiendo una buena oxigenación; mientras que la concentración de sulfuro aumentaba con respecto a la profundidad, debido a que, la penetración de la luz en aguas turbias es menor, reduciendo la fotosíntesis y provocando una producción de oxígeno relativamente baja. Las concentraciones de sulfuro que se obtuvieron sobrepasaron los límites establecidos por los criterios ecológicos para la Calidad del Agua en México, por lo que se recomendó realizar estudios periódicamente en las temporadas de secas y lluvias debido a la importancia socioeconómica que representa el lago para los habitantes de la comunidad ya que se desempeña actividad pesquera y turística.

Alvarado(2015) realizó una evaluación espacial de la contaminación potencial y difusa en la cuenca del Río Grande de Comitán, identificando que el mayor número de fuentes potenciales de contaminación están asociadas a las zonas urbanas. Así mismo identificó que la agricultura de riego y la agricultura temporal son las fuentes potenciales de

contaminación de mayor impacto debido a que reciben el 45% del agua concesionada dentro de la cuenca del Río Grande. Concluyendo que las subcuenas La independencia, Yocnajib El Rosario y Comitán, que pertenecen a la zona alta y media de la cuenca, presentan mayor riesgo potencial a la contaminación por lo que recomendó tomar medidas preventivas para evitar la contaminación de la cuenca baja y el sistema lacustre.

Vera-Franco *et al* (2015) obtuvieron perfiles de temperatura, oxígeno disuelto, turbidez y concentración de clorofila-a en nueve lagos, con el objetivo de evaluar el estado trófico utilizando la clorofila-a como proxy. Describió a los lagos con diferente estado trófico, desde oligotróficos hasta meso-eutróficos.

Guadarrama (2017) realizó un estudio de la comunidad bentónica de 6 lagos. Reportó parámetros ambientales del agua de fondo (temperatura, oxígeno disuelto, pH y conductividad). Encontró que los lagos se encontraban estratificados térmicamente con temperatura de fondo que variaron de 17.9°C a 22.2°C y con anoxia hipolimnética, el pH registró valores entre 7 y 7.3 y la conductividad se reportó con valores entre 246 y 823 $\mu\text{S cm}^{-1}$.

Mora *et al.* (2017) describieron los cambios químicos en diez lagos del PNLM (Balantetic, Vuelta de agua, San Lorenzo, Yalalush, Bosque Azul, Montebello, Tzisco, Pojoj, Cinco Lagos, Dos Lagos) midiendo, a 1 metro de profundidad, temperatura, pH y conductividad eléctrica. Concluyeron que el sistema de lagos del Parque Nacional “Lagunas de Montebello” puede ser dividido en dos grupos, de acuerdo con la geología local y a la geomorfología; los lagos con carácter sulfatado de calcio-magnesio y los lagos con propiedades bicarbonatadas de calcio-magnesio. Observaron que existe un gradiente de sulfatos y una disminución de cloruros relacionados con el río. La calidad del agua de los lagos pertenecientes al primer grupo está controlada por las rocas calizas, dolomíticas y el bloque de yeso presente en la cuenca. La erosión y el drenaje de la ciudad incrementan la cantidad de cloruros en el agua; la calidad del agua del segundo grupo está controlada por el intercambio de masas de agua que se da a través de pequeños canales que conectan los lagos.

3. Justificación

El Parque Nacional “Lagunas de Montebello” (PNLM) está catalogado como área natural protegida (ANP), es un importante reservorio de agua y juega un papel fundamental en el desarrollo turístico de la región. Desde el año 2003 se han reportado cambios en la coloración de los lagos del PNLM y hasta la fecha se han realizado pocos estudios limnológicos para poder entender y hacer frente al problema que está presentando el sistema lacustre. Dentro de los puntos menos conocidos de los lagos de Montebello están los sedimentos y sus características.

El estudio de los sedimentos de un lago es fundamental para determinar el estado de salud de éste, las variables texturales como la media, moda, selección, asimetría y la agudeza ayudan a comprender el origen, el tamaño y distribución de las partículas y el transporte de éstas. Por lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo reconocer la composición, tamaño de grano y principales variables texturales, así como de la concentración de carbono, nitrógeno y azufre elementales de los sedimentos de un conjunto representativo de 18 lagos del PNLM y analizar su relación con los parámetros físico-químicos del agua de fondo, con el fin de establecer una línea base de referencia para poder reconocer los cambios que se han dado y se siguen dando en el tiempo por efectos antropogénicos.

4. Hipótesis

A pesar de que todos los lagos del PNLM se encuentran en un mismo distrito lacustre y son del mismo origen –kársticos o de disolución- y edad, se han reconocido dos tipos principales dependiendo de su alimentación hídrica: los de planicie en los que predomina la alimentación superficial y los de montaña en los que domina la alimentación subterránea. Los de planicie son los que se han visto más afectados por las actividades antrópicas, por lo que se espera que los de planicie presenten sedimentos con características de tamaño y parámetros texturales diferentes a los de montaña. Si esto se

confirma, esta caracterización sedimentaria permitirá reconocer aquellos lagos que están en proceso de ser alterados.

5. Objetivos

5.1 Objetivo General

Caracterizar los sedimentos presentes en 18 lagos del Parque Nacional Lagunas de Montebello, Chiapas.

5.2 Objetivos Particulares

1. Determinar el tamaño de grano y las principales variables texturales de los sedimentos de los lagos en estudio.
2. Determinar la concentración de materia orgánica y carbonatos presente en los sedimentos de los lagos.
3. Determinar la concentración de carbono, nitrógeno y azufre elemental de los sedimentos de los lagos.
4. Comparar las características sedimentarias de los lagos de planicie con los de montaña, los profundos con los someros y los impactados con los no impactados.

6. Área de estudio

El Parque Nacional “Lagunas de Montebello” (PNLM) es un área natural protegida que cuenta con 6,425 hectáreas de extensión. Los servicios ambientales más importantes que brinda el parque son: la captación de agua proveniente de la cuenca del Río Grande de Comitán, la función de regulador climático local y la de corredor biológico (SEMARNAT, 2016).

El PNLM se localiza en la región sursureste del estado de Chiapas, a 16° 04' 40" y 16°10' 20" de latitud Norte y 91° 37' 40" y 91°47' 40" de longitud Oeste, con altitud variante entre 1,200 y 1,800 m s.n.m., comprendiendo así parte de los municipios La Independencia y la

Trinitaria (Fig. 1). Fue designado ANP el 16 de diciembre de 1959 por decreto publicado en el Diario Oficial de la Federación con el fin de conservar los suelos, bosques y lagunas de la región (CONANP-SEMARNAT, 2007). El 27 de noviembre de 2003 fue declarado Sitio Ramsar, criterios 1 y 2. Se encuentra dentro de la Región Hidrológica Nacional No. 30 Grijalva-Usumacinta y forma parte de la subcuenca del río Comitán con 545 km², que a su vez es parte de la cuenca del río Lacantún (INEGI, 1988).

El PNLM alberga el 4% de la riqueza total estimada de mariposas, anfibios, reptiles, aves y mamíferos para México (Flores-Villela, 1993; Navarro y Benítez, 1993; Arita y Ceballos, 1997), tiene registro de 102 especies de invertebrados, 15 de anfibios, 35 de reptiles, 277 de aves y 65 especies de mamíferos (Horváth, 2007) y asociaciones vegetales como: bosques de coníferas, bosque mesófilo de montaña, vegetación riparia, vegetación secundaria y zonas de cultivo (Inventario Forestal Nacional, 2000-2001; CONANP-SEMARNAT, 2007). Se tienen registradas 208 especies de árboles y 50 de orquídeas.

El tipo de clima en el Parque es tipo C(fm) templado húmedo con lluvias todo el año y en el extremo noroeste es tipo A(cm) cálido húmedo con lluvia en verano (García, 1981). La temperatura media mensual es de 23.6°C. El mes más cálido es abril con temperatura promedio mensual de 25.6°C y el mes más frío es enero con temperatura promedio de 20.9°C (CONANP-SEMARNAT, 2007). La precipitación del mes más seco es menor a 40 mm y en temporada de lluvia la precipitación es de 1,200 a 1,400 mm.

Los lagos del PNLM se dividen en sistemas de lagos, siendo los principales Tepancoapan y Candelaria. El Sistema Tepancoapan cuenta con 13 km de longitud y comprende los lagos de San Lorenzo, Bosque Azul, Peninsular, La Encantada, Bartolo, Peñasquito y Yalalush. Este sistema se alimenta de las aguas del Río Grande de Comitán, las cuales llegan al lago Chinkultick y de ahí hasta el lago la Encantada, así como del aporte de aguas subterráneas. El Sistema Candelaria cuenta con 7 km de longitud, se extiende desde Tziscoa hasta Esmeralda contando con los lagos Tziscoa, Pojoj, Montebello y Cinco Lagos (CONANP-SEMARNAT, 2007).

Los cuerpos de agua ocupan el 16% de la superficie del PNLM (CONANP-SEMARNAT, 2007). El Río Grande de Comitán cruza la ciudad de Comitán de Domínguez, cuyas aguas

desembocan en éste y conforma una amenaza de contaminación al sistema hidrológico de Montebello, siendo el Sistema Tepancoapan el más afectado (Vázquez y Méndez, 1994).

En el Parque se tienen registrados las categorías de uso de suelo para áreas forestales, cuerpos de agua, áreas inundables de popal-tular, áreas agrícolas y asentamiento humano, siendo la conservación de bosques de pino, pino-encino y pino-encino-liquidámbar el uso de suelo predominante. Se identifican los suelos de tipo: litosoles, rendzinas, vertisoles, acrisoles, fluviosoles y gleysoles, esto debido al desarrollo de los suelos de las calizas o sedimentos fluviales y lacustres (Vázquez y Méndez, 1994; INEGI, 2000).

Las características morfológicas principales son: lomeríos de poca altura con laderas de variable inclinación (algunos pueden formar paredes abruptas) orientados paralelamente en dirección NO a SE. Los lomeríos están separados por depresiones rellenas con acumulación de materiales de suelo residuales ("cockpits") o cubiertos por los lagos. Muchos de los lagos se han formado en depresiones cársticas alargadas, rellenas y tapadas con sedimentos ("uvalas") al nivel del manto freático. Los lagos se comunican entre sí por conductos subterráneos y canales superficiales que durante las temporadas de mayor precipitación funcionan como conductos activos al alimentarse de la precipitación (CONANP-SEMARNAT, 2007).

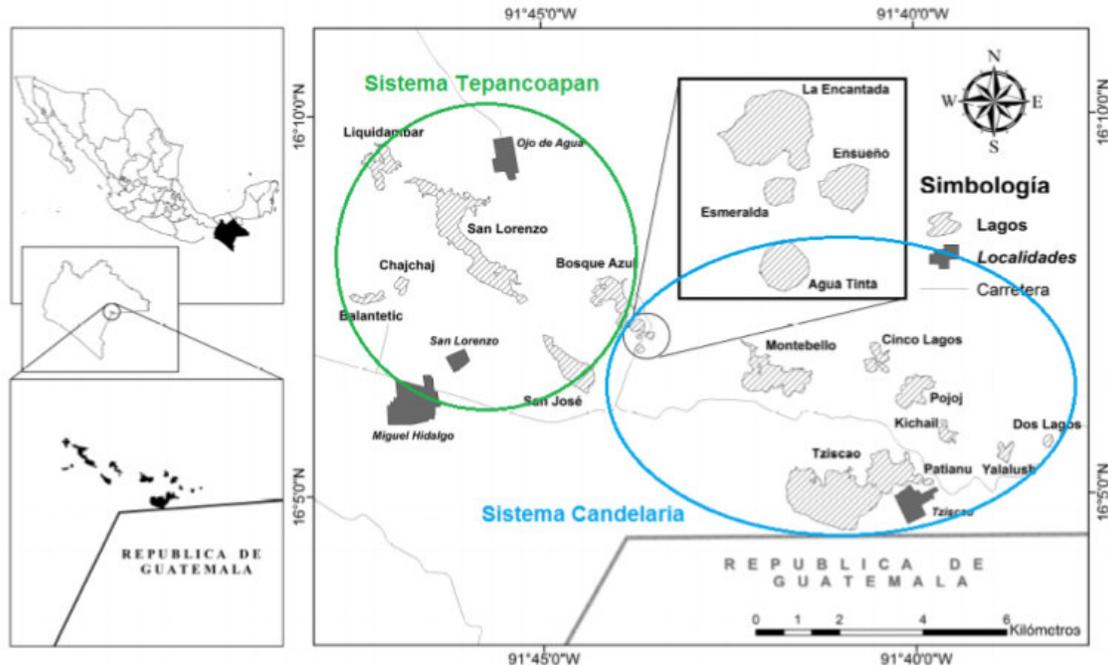


Fig. 1. Mapa de los lagos del Parque Nacional Lagunas de Montebello (editado de Alcocer *et al.*, 2016). Se incluyen los nombres de los lagos estudiados. En verde los lagos pertenecientes al sistema Tepancoapan (de planicie), en azul los lagos del sistema Candelaria (de montaña)

7. Materiales y Métodos

7.1 Trabajo de Campo

Se muestrearon 16 lagos del PNLM en febrero del 2015 (Tabla 1), ubicando una estación de muestreo en la parte central y más profunda de cada lago. En cada estación se tomaron muestras para el análisis del sedimento, utilizando una draga tipo Ekman (15x15x15 cm). De cada muestra se tomaron manualmente dos núcleos de sedimento, considerando solo la capa más superficial; el primer núcleo se utilizó para el análisis de C, N, y S elementales y el segundo núcleo para los análisis texturales, de materia orgánica y carbonatos. Los sedimentos se mantuvieron en frío y oscuridad, hasta su posterior análisis.

En la Tabla 1 se presenta la clasificación de los lagos de acuerdo con Alcocer *et al.* (2016) y Vera-Franco (2017). Se reconocieron 12 lagos profundos y 4 funcionalmente someros (Balantetic, Chajchaj, Esmeralda Yalalush). Por otro lado, los lagos impactados fueron 6

(Balantetic, Liquidámbar, Chajchaj, San Lorenzo, Bosque Azul y La Encantada) y los no impactados 12.

Tabla 1. Ubicación geográfica, características morfométricas (Zmed = profundidad media) y clasificación descrito en Alcocer *et al.* (2016) y el estado trófico obtenido de Vera-Franco (2017). (Som/Pro = somero/profundo; Nimp/Imp = no impactado/impactado) de 16 lagos del PNLM. (Los lagos se ordenan en el sentido NW-SE).

Lago	Coordenadas	Área (ha)	Zmed(m)	Clasificación		Estado Trófico
				Pro	Imp	
San Lorenzo	16°7' N, 91°45' W	181.3	11.8	Pro	Imp	Eutrófico
Balantetic	16°7' N, 91°47' W	13.6	1.7	Som	Imp	Mesotrófico
Chajchaj	16°7'N, 91°46' W	9.2	5.3	Som	Imp	Oligotrófico
Bosque Azul	16°7' N, 91°43' W	52.2	20	Pro	Nimp	Mesotrófico
San José	16°6' N, 91°44' W	60.6	10.3	Pro	Nimp	Ultra- oligotrófico
La Encantada	16°7' N, 91°43' W	8.2	29.4	Pro	Nimp	Mesotrófico
Esmeralda	16°7' N, 91°43' W	1.1	3.6	Som	Nimp	Ultra- oligotrófico
Ensueño	16°7' N, 91°43' W	2.7	21.6	Pro	Nimp	Ultra- oligotrófico
Agua Tinta	16°6' N, 91°43' W	3	14.7	Pro	Nimp	Ultra- oligotrófico
Montebello	16°6' N,	96.2	12.3	Pro	Nimp	Ultra-

	91°41' W					oligotrófico
Cinco Lagos	16°6' N, 91°40' W	23.7	42.5	Pro	Nimp	Ultra- oligotrófico
Pojoj	16°6' N, 91°39' W	43.7	35.2	Pro	Nimp	Ultra- oligotrófico
Kichail	16°5' N, 91°39' W	12.5	9.5	Pro	Nimp	Oligotrófico
Patianú	16°5' N, 91°39' W	3.4	10.8	Pro	Nimp	Ultra- oligotrófico
Yalalush	16°5' N, 91°38' W	11.5	9.9	Som	Nimp	Ultra- oligotrófico
Dos Lagos	16°5' N, 91°38' W	5.2	25.5	Pro	Nimp	Ultra- oligotrófico

7.2 Trabajo de laboratorio

El análisis textural se realizó con ayuda de un equipo Láser Beckman Counter LS230, usando la escala de Wentworth (1922) para clasificar texturalmente los sedimentos. Los parámetros texturales de las muestras siguieron el criterio de Folk y Ward (1957). Se separaron dos muestras de sedimento: la primera para calcular el porcentaje de materia orgánica mediante la aproximación indirecta con base en la técnica de pérdida en combustión (LOI) a 550°C; la segunda para cuantificar los carbonatos en el sedimento mediante una acidificación.

Para el análisis elemental de los sedimentos se dio un pretratamiento a las muestras. Cada muestra, se colocó en cápsulas de porcelana, previamente pesadas. Las cápsulas con el sedimento se colocaron al horno a 60°C por 3 días consecutivos (o hasta que las muestras estuvieran totalmente secas). Se pesó cada cápsula con el sedimento y se restó el peso de cada cápsula para conocer el peso del sedimento (Fig. 2). Posteriormente, se realizó la acidulación de cada muestra utilizando una solución de HCl 0.2 N. Se repitió el

acidulado hasta que las muestras alcanzaron un pH de 2 (dejando sedimentar y quitando sobrenadante entre cada acidulación) (Fig. 3). Después se enjuagaron las muestras de sedimento con agua destilada, hasta alcanzar un pH de 7 (dejando sedimentar y quitando sobrenadante entre cada enjuague) (Fig. 4). Se secaron las muestras a 60°C por 3 días (o hasta que estuvieron totalmente secas), para después macerarlas y ponerlas en sus respectivos viales rotulados (Fig. 5). Finalmente, para el análisis de C, N y S elemental se utilizó un analizador elemental Carlo Erba® modelo NC2100 en la USAII de la Facultad de Química.



Fig. 2. Muestras secas de sedimentos de todos los lagos en estudio previas al acidulado.



Fig. 3. Acidulado de las muestras de sedimentos. A) Ejemplo de primera acidulación, B) Sigüientes acidulaciones,



Fig. 4. Muestras para enjuagar después de alcanzar un pH de 2.

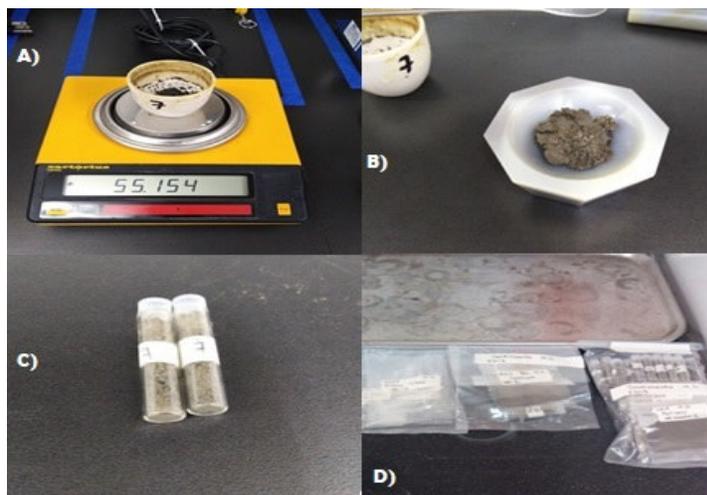


Fig. 5. Procesamiento de muestras de sedimentos. A) pesaje, B) maceración, C) empacamiento en viales, D) muestras previo al envío para su análisis químico.

7.3 Trabajo de gabinete

Se obtuvieron los parámetros fisicoquímicos (temperatura, oxígeno disuelto, porcentaje de saturación, pH, conductividad, potencial redox y turbidez) del agua de fondo de la base de datos del proyecto del GILT-FRS Iztacala. Se calcularon la media y la desviación estándar, así mismo se hicieron las gráficas de cada parámetro fisicoquímico.

Posteriormente, se realizó un análisis de cúmulos con ayuda del lenguaje de programación R y la interfaz RStudio, con todos los parámetros fisicoquímicos del agua de fondo escalando los datos para tener magnitudes similares restando el promedio y dividiendo entre la desviación estándar de cada variable (función scale de R). Se utilizó la métrica de similitud de la distancia euclidiana y como método de aglomeración el de WardD de RStudio. Se estableció que la magnitud de la disimilitud (altura) entre las muestras se mantuviera en un intervalo entre 60 y 70% con el fin de tener al menos 3 grupos en cada uno de los análisis de cúmulos.

Para el análisis de los sedimentos se realizó una clasificación textural conforme al porcentaje de sus fracciones de arcillas, limos y arenas con ayuda del diagrama triangular de texturas de Shepard (1954). Se editó un diagrama triangular para todos los lagos muestreados del PNLN. El segundo análisis de cúmulos se llevó a cabo con todos los parámetros granulométricos escalando los datos y utilizando la métrica de similitud de la distancia euclidiana y como método de aglomeración el de Ward D de RStudio.

Para el análisis granulométrico, se utilizaron primero los parámetros estadísticos de media ($Mz\Phi$) y moda según las clasificaciones de Udden-Wentworth (Wentworth, 1922).

El tamaño medio y la clase más abundante están definidas por la Ecuación 1:

$$Mz\Phi = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde la clasificación de la media ($Mz\Phi$) y moda están determinados por los valores de ϕ :

-1.00 < $Mz\Phi$ < 0.00	Arena muy gruesa
0.00 < $Mz\Phi$ < 1.00	Arena gruesa
1.00 < $Mz\Phi$ < 2.00	Arena mediana
2.00 < $Mz\Phi$ < 3.00	Arena fina
3.00 < $Mz\Phi$ < 4.00	Arena muy fina
4.00 < $Mz\Phi$ < 5.00	Limo grueso
5.00 < $Mz\Phi$ < 6.00	Limo medio
6.00 < $Mz\Phi$ < 7.00	Limo fino
7.00 < $Mz\Phi$ < 8.00	Limo muy fino
8.00 < $Mz\Phi$	Arcilla

Después se realizó el análisis de la selección ($\sigma_1\Phi$), asimetría (Sk_I) y la agudeza o kurtosis (K_G) según las clasificaciones usadas por Folk y Ward.

La selección de los sedimentos está determinada por la Ecuación 2:

$$\sigma_1\Phi = \frac{\phi_{84} + \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde la clasificación de la selección ($\sigma_1\Phi$) está definida por los valores de Φ :

<0.35 ϕ	Muy bien clasificado / seleccionado
0.35 ϕ - 0.50 ϕ	Bien clasificado / seleccionado
0.50 ϕ - 0.71 ϕ	Moderadamente bien clasificado / seleccionado
0.71 ϕ - 1.00 ϕ	Moderadamente clasificado / seleccionado
1.00 ϕ - 2.00 ϕ	Pobremente clasificado / seleccionado
2.00 ϕ - 4.00 ϕ	Mal clasificado / seleccionado
> 4.00 ϕ	Muy mal clasificado / seleccionado

La asimetría (Sk_I) está dada por la Ecuación 3:

$$Sk_I = \frac{\phi_{84} + \phi_{16} + 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_{95} + \phi_5 - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde la clasificación de la asimetría (Sk_I) está determinada por los siguientes valores:

+1.00 - +0.30	Asimetría muy positiva
+0.30 - +0.10	Asimetría positiva

+0.1 - -0.10	Simétrica
-0.10 - -0.30	Asimetría negativa
-0.30 - -1.00	Asimetría muy negativa

La agudeza o kurtosis está definida por la Ecuación 4:

$$KG = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44 (\phi_{75} - \phi_{25})} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Dónde:

< 0.67	Muy platicúrtico
0.67 – 0.90	Platicúrtico
0.90 – 1.11	Mesocúrtico
1.11 – 1.50	Leptocúrtico
1.50 – 3.00	Muy leptocúrtico
> 3.00	Extremadamente leptocúrtico

Los porcentajes de carbonatos y el contenido de materia orgánica presente en los lagos en estudio se obtuvieron durante el pretratamiento de las muestras de sedimento. El porcentaje peso de carbonatos se obtuvo con la Ecuación 5:

$$\% \text{Carbonatos} = 100 \left(1 - \frac{PTS - PSsC}{PTS} \right) \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

PTS: Peso total del sedimento

PSsC: Peso sedimentos sin carbonatos

El porcentaje peso de materia orgánica contenida en cada muestra se calculó con base en la técnica de pérdida en combustión (LOI) y la Ecuación 6:

$$\%MO = 100 \left(1 - \frac{PTS - PSsMO}{PTS} \right) \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

PTS: Peso total del sedimento

PSsMO: Peso sedimento sin materia orgánica

Se obtuvieron los promedios de los porcentajes de materia orgánica para cada lago. Posteriormente, se obtuvo el promedio de los porcentajes de C, N y S elemental para poder realizar un análisis de cúmulos con los porcentajes tanto de materia orgánica, carbonatos y contenido de C,N y S elemental de los lagos en estudio utilizando la misma métrica y el mismo método en RStudio. Posteriormente se obtuvo de relación C/N para cada uno de los grupos de los lagos.

Se realizaron gráficas de dispersión de las variables contenidas en el sedimento (CO₃, MO, C, N y S elemental) contra la profundidad media de los lagos clasificados de acuerdo con el dendrograma de contenido en sedimento.

Para cada clasificación, se realizó un análisis de componentes principales con ayuda de RStudio. Posteriormente, se comparó el resultado con los respectivos dendrogramas para observar las variables que más influyen en las clasificaciones.

Se realizó un mapeo con ayuda de ArcMap para poder observar y comparar espacialmente los análisis de cúmulos con los sistemas Candelaria y Tepancoapan.

8. Resultados

8.1 Parámetros fisicoquímicos del agua de fondo

La temperatura promedio de los lagos fue de $18.1 \pm 0.9^{\circ}\text{C}$ con un intervalo entre 17.1 y 20.7°C . La temperatura mínima se registró en Montebello y la máxima en Balantetic. La concentración de oxígeno disuelto (OD) varió desde los 0 mg/L (anoxia) hasta los 18 mg/L, con un promedio de 5.7 ± 4.2 mg/L. El valor mínimo de OD se localizó en San Lorenzo, La Encantada y Dos Lagos y el máximo se localizó en Balantetic. El porcentaje de saturación de oxígeno (%SAT) promedio fue de $73 \pm 57\%$. El %SAT mínimo se localizó en La Encantada (0%) y el valor máximo en Balantetic (243%). Con respecto a la conductividad eléctrica (K_{25}) el promedio fue de $485 \pm 313\mu\text{S/cm}$, hallándose el mínimo ($190 \mu\text{S/cm}$) en Montebello y el valor máximo ($1,161 \mu\text{S/cm}$) en Dos Lagos. El pH varió desde 7.3 hasta 8.8 , con un promedio de 8.2 ± 0.4 ; el valor mínimo de pH se registró en Dos Lagos y el máximo en Balantetic. El potencial redox promedio fue de $251 \pm 111\text{mV}$. El valor mínimo se registró en La Encantada (-1.4 mV) y el valor máximo en San José (371 mV). La turbidez de los lagos varió desde 0 hasta 179 NTU con un promedio de 28 ± 48 NTU. El valor mínimo de turbidez se registró en Esmeralda, Ensueño, Agua Tinta, Pojoj y Kichail, mientras que el valor máximo se registró en Chajchaj (Tabla 2).

Tabla 2. Valores mínimos y máximos (primer renglón) junto con valores promedios y desviaciones estándar (segundo renglón) de los parámetros fisicoquímicos del agua de fondo de los lagos en estudio. (T = temperatura, OD = oxígeno disuelto, %SAT= porcentaje de saturación de OD, K₂₅ = conductividad eléctrica estandarizada a 25°C, redox = potencial de óxido-reducción, Tur = turbidez), en los lagos donde los valores de los parámetros se conservaron en los 3 últimos metros únicamente se muestra el valor con desviaciones estándar igual a 0.0. Valores mínimos y máximos (primer renglón) y promedio con desviaciones estándar (segundo renglón) de clorofila-a a lo largo de la columna de agua (Clor-a) tomados de Vera-Franco (2017). (En verde claro los lagos someros impactados, en verde oscuro profundos impactados, en azul claro someros no impactados y azul oscuro profundos no impactados).

Lago	T (°C)	OD (mg/L)	%SAT (%)	pH (U)	K ₂₅ (μS/cm)	Redox (mV)	Tur (NTU)	Clor-a (μg/L)
San Lorenzo	17.3 ± 0.0	0.1 ± 0.0	1 ± 0.1	7.8 – 7.9 7.9 ± 0.1	745.2 – 754.9 749.0 ± 5.2	61.0 – 75.0 68.7 ± 7.1	15 – 88 39 ± 43	6.6 – 39.3 36.9 ± 48.8
Balantetic	20.7 ± 0.0	18.0 ± 0.0	243 ± 0	8.8 ± 0.0	946.5 ± 0.0	323.0 ± 0.0	40 ± 0	6.7 – 10.8 8.8 ± 2.9
Chajchaj	18.1 – 18.2 18.1 ± 0.0	7.5 – 8.3 7.9 ± 0.0	97 – 106 101.6 ± 5	8.6 ± 0.0	1023 – 1027 1025.3 ± 2.1	274 – 279 277.3 ± 2.9	5 – 527 179 ± 302	6.7 – 6.9 6.8 ± 0.1
Bosque Azul	17.3 ± 0.0	3.2 – 3.3 3.2 ± 0.0	40 – 41 41 ± 1	8.1 ± 0.0	537.9 – 539.8 538.9 ± 0.9	287.2 – 287.5 287.4 ± 0.1	8 – 275 97 ± 154	3.4 – 23 13.2 ± 13.9
San José	17.2 ± 0.0	5.4 – 5.5 5.5 ± 0.1	69 – 70 70 ± 1	8.3 ± 0.0	367.4 – 367.5 367.5 ± 0.1	371 ± 0.0	4 – 6 5 ± 1	0.5 – 1.0 0.8 ± 0.4
La Encantada	17.9 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0 ± 0	7.6 ± 0.0	474.2 ± 0.0	-1.6 - -1.2 -1.4 ± 0.2	2 – 60 22 ± 34	1 – 24.2 12.6 ± 16.4
Esmeralda	19.0 ± 0.02	6.4 ± 0.0	83 ± 1	8.2 ± 0.5	374.6 ± 0.5	292.3 ± 0.6	0 ± 0	0.6 – 0.9 0.8 ± 0.2
Ensueño	18.5 ± 0.0	7.0 ± 0.0	90 ± 0	8.3 – 8.4 8.4 ± 0.1	265.0 – 265.1 265.0 ± 0.1	283.0 – 288.0 286.3 ± 2.9	0 ± 0	0.2 – 0.9 0.6 ± 0.5
Agua Tinta	18.7 ± 0.0	6.3 – 6.4 6.4 ± 0.0	82 ± 0	8.3 ± 0.0	378.5 – 378.6	285.0 – 286 285.7 ± 0.6	0 ± 0	0.6 – 2.0 1.3 ± 1.0

					378.6 ± 0.1			
Montebello	17.1 ± 0.0	7.0 ± 0.1	87 – 88 88 ± 1	8.3 ± 0.0	189.6 – 189.7 189.6 ± 0.1	305.0 – 306.0 305.7 ± 0.6	0 – 7 3 ± 4	0.3 – 0.7 0.5 ± 0.3
Cinco Lagos	18.3 ± 0.0	6.1 ± 0.0	77 ± 0	8.3 ± 0.0	212.2 ± 0.0	314.0 ± 0.0	0 ± 0	0.3 – 0.5 0.4 ± 0.1
Pojoj	18.7 ± 0.0	6.0 - 6.3 6.2 ± 0.2	78 – 81 80 ± 2	8.3 – 8.4 8.4 ± 0.0	214.0 – 214.8 214.3 ± 0.5	292.0 – 295.0 293.0 ± 1.7	0 ± 0	0.2 – 2.2 1.2 ± 1.4
Kichail	17.4 – 17.5 17.4 ± 0.0	6.7 – 6.8 6.7 ± 0.0	84 – 85 85 ± 1	8.2 ± 0.0	283.8 – 284.0 283.9 ± 0.1	292.0 – 293.0 292.7 ± 0.6	0 ± 0	0.5 – 4.5 2.5 ± 2.8
Patianú	17.3 ± 0.0	3.7 – 3.8 3.7 ± 0.1	46 – 47 46 ± 1	8.0 ± 0.0	277.0 ± 0.0	256.0 – 307.0 274.0 ± 28.6	2 – 66 37 ± 32	0.4 – 0.5 0.5 ± 0.1
Yalalush	17.3 – 17.4 17.4 ± 0.0	7.0 ± 0.1	88 – 90 89 ± 1	8.3 ± 0.0	303.2 – 303.5 303.3 ± 0.2	305.0 – 321.0 315.3 ± 9.0	0 – 69 23 ± 40	0.2 – 0.4 0.3 ± 0.1
Dos Lagos	18.6 ± 0.02	0.0 – 0.1 0.1 ± 0.0	1 ± 0	7.2 – 7.3 7.3 ± 0.1	477.7 – 1545.0 1160.9 ± 593.2	3 – 68 36.7 ± 32.6	1 – 34 12 ± 19	0.2 – 1.3 0.8 ± 0.8

En general, con base en un análisis de clasificación utilizando los parámetros fisicoquímicos se forman 3 grupos de lagos a un nivel de corte de 67% de disimilitud. El Grupo 1 está formado por Esmeralda, Agua Tinta, Cinco Lagos, Ensueño, Pojoj, Patianú, San José, Yalalush, Montebello y Kichail; el Grupo 2 por San Lorenzo, La Encantada y Dos Lagos; el Grupo 3 está conformado por Balantetic, Chajchaj y Bosque Azul (Fig. 6).

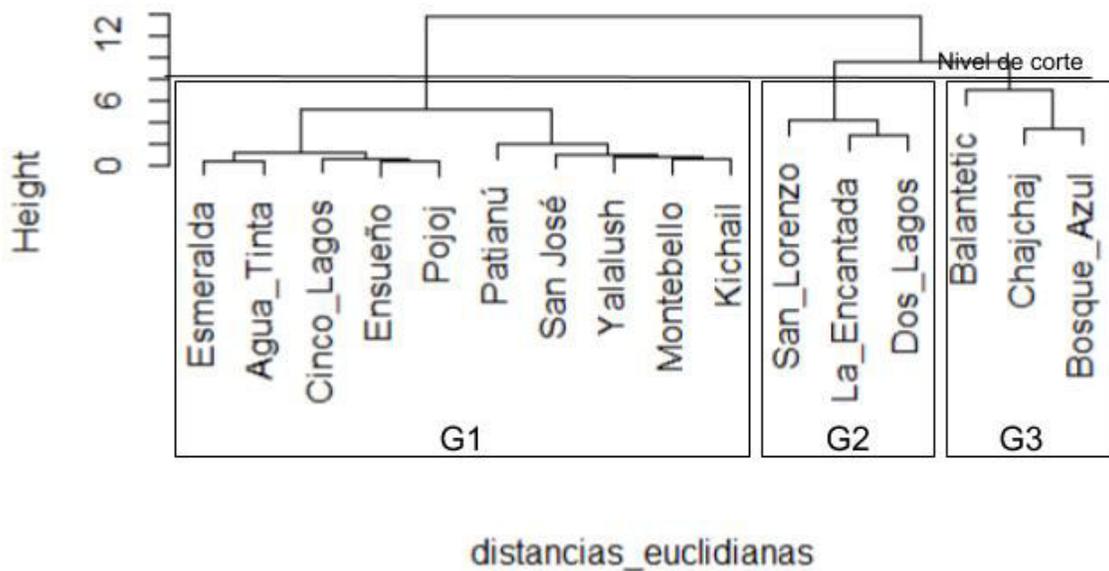


Fig. 6. Dendrograma de clasificación de los lagos del PNLM con base en los parámetros fisicoquímicos del agua de fondo y valores de clorofila-a tomados de Vera-Franco *et al.* (2015). (G1= Grupo 1, G2= Grupo2, G3= Grupo 3).

Del análisis de componentes principales de los parámetros fisicoquímicos, realizado con RStudio, se obtuvieron 3 componentes principales que explican 88.67% de la variabilidad total. La varianza de los primeros 3 componentes principales es mayor a 1.157 cumpliendo con el criterio de Kaiser (1974).

En la Tabla 3 se muestran las proporciones de los componentes principales CP1FQ, CP2FQ y CP3FQ que son explicados por los parámetros fisicoquímicos. Se observa que el componente CP1FQ es explicado mejor por el OD, %SAT, el pH y el redox; el componente CP2FQ recibe mayor peso por parte de la K_{25} , la turbidez y la Clor-a; la temperatura y la turbidez explican mejor el componente CP3FQ.

Tabla 3. Matriz de las correlaciones estimadas a partir de la solución factorial entre los componentes principales (CP1FQ, CP2FQ y CP3FQ) de los parámetros fisicoquímicos.

Parámetros Fisicoquímicos	CP1FQ	CP2FQ	CP3FQ
Temperatura	0.275	-0.338	0.592
Oxígeno disuelto (OD)	0.487	-0.142	0.056
Porcentaje de Saturación (%SAT)	0.483	-0.160	0.072
pH	0.462	-0.031	-0.300
Conductividad eléctrica (K_{25})	-0.087	-0.647	0.124
Potencial de óxido-reducción (redox)	0.420	0.263	-0.313
Turbidez	-0.001	-0.462	-0.617
Clor-a	-0.238	-0.371	-0.237

Al graficar los lagos en el plano formado por los componentes principales CP1FQ y CP2FQ, y con ayuda del análisis de cúmulos de los parámetros fisicoquímicos, se encontró que la K_{25} es la variable que diferencia el Grupo 1 de los otros dos grupos, los lagos del Grupo 1 presentan menor K_{25} (entre 190 y 379 $\mu\text{S}/\text{cm}$), mientras que, para los demás lagos la K_{25} toma valores mayores con intervalos desde los 474 hasta 1,061 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Grupo 2) y desde 539 hasta 1,025 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Grupo 3). El OD, %SAT y el redox son las variables más importantes que separan al Grupo 2 del resto de los lagos pertenecientes al Grupo 2 tienen fondo anóxico, mientras que el OD y %SAT en el Grupo 3 (desde 3.2 hasta 18.0 mg/L con %SAT entre 41 y 243%) es mayor que en el Grupo 1 (desde los 3.7 hasta 7.0 mg/L con %SAT entre 46 y 90%); los valores cercanos a 0 de redox se encuentran en los lagos del Grupo 2 (entre -1.4 y 68.7 mV), mientras que, para el Grupo 1 va desde los 274 hasta 315 mV y desde los 277 hasta 323 mV para el Grupo 3 (Fig. 7).

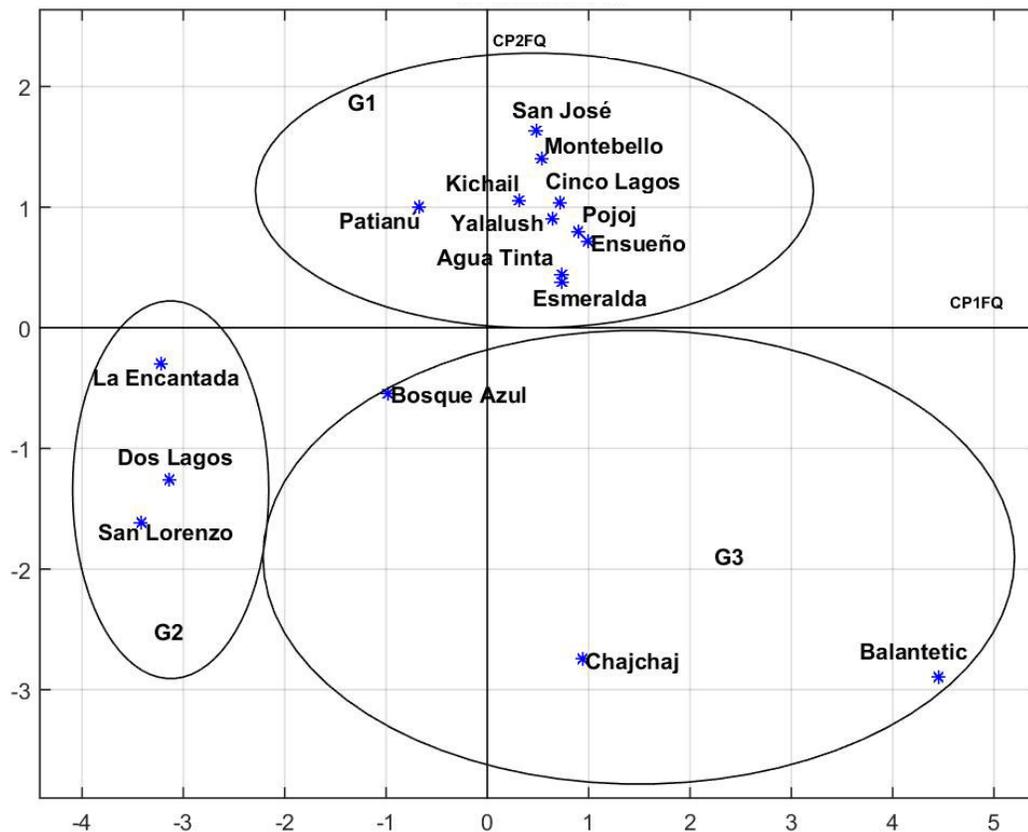


Fig. 7. Distribución de los lagos de estudio con respecto a los componentes principales CP1FQ (eje X) y CP2FQ (eje Y) con base en los parámetros fisicoquímicos del agua de fondo y valores de clorofila-a tomados de Vera-Franco *et al.* (2015). (G1 = Grupo 1, G2 = Grupo 2, G3 = Grupo 3).

8.2 Granulometría y parámetros texturales del sedimento

Los porcentajes de arenas variaron entre 2.8% y 67.6%, para Bosque Azul y Cinco Lagos, respectivamente. Los porcentajes de limos se registraron entre 31.3% (Cinco Lagos) y 88.9% (Agua Tinta). Finalmente, los porcentajes de arcillas se encontraron entre 0.1% y 51.4%, para Pojoj y San Lorenzo, respectivamente (Tabla 4).

Tabla 4. Clasificación textural de los sedimentos de los lagos muestreados en el PNLM. Los lagos se muestran ordenados de acuerdo con la Tabla 1. (En verde claro los lagos someros impactados, en verde oscuro profundos impactados, en azul claro someros no impactados y azul oscuro profundos no impactados).

N°	Lago	Fracciones (%)			Clasificación
		Arenas	Limos	Arcillas	
1	San Lorenzo	0.0	48.6	51.4	Arcilla limosa
2	Balantetic	0.0	65.7	34.3	Limo arcilloso
3	Chajchaj	5.3	80.1	14.7	Limo
4	Bosque Azul	2.8	87.3	9.9	Limo
5	San José	0.0	74.6	25.4	Limo arcilloso
6	La Encantada	19.6	74.5	5.9	Limo
7	Esmeralda	5.2	80.5	14.2	Limo
8	Ensueño	19.4	74.9	5.7	Limo
9	Agua Tinta	1.9	88.9	9.1	Limo
10	Montebello	9.5	82.3	8.2	Limo
11	Cinco Lagos	67.6	31.3	1.0	Arena limosa
12	Pojoj	56.1	42.9	0.1	Arena limosa

13	Kichail	56.7	42.7	0.6	Arena limosa
14	Patianú	0.0	64.2	35.8	Limo arcilloso
15	Yalalush	9.0	80.6	10.4	Limo
16	Dos Lagos	50.4	47.4	2.2	Arena limosa

En el diagrama triangular de Shepard (Fig. 8) se pueden distinguir dos grandes grupos: el primero, dominado por las arenas (Cinco Lagos, Pojoj, Kichail y Dos Lagos) y el segundo, dominado por los limos (Balantetic, Chajchaj, Bosque Azul, San José, La Encantada, Esmeralda, Ensueño, Agua Tinta, Montebello, Yalalush y Patianú). Solo San Lorenzo está dominado por las arcillas.

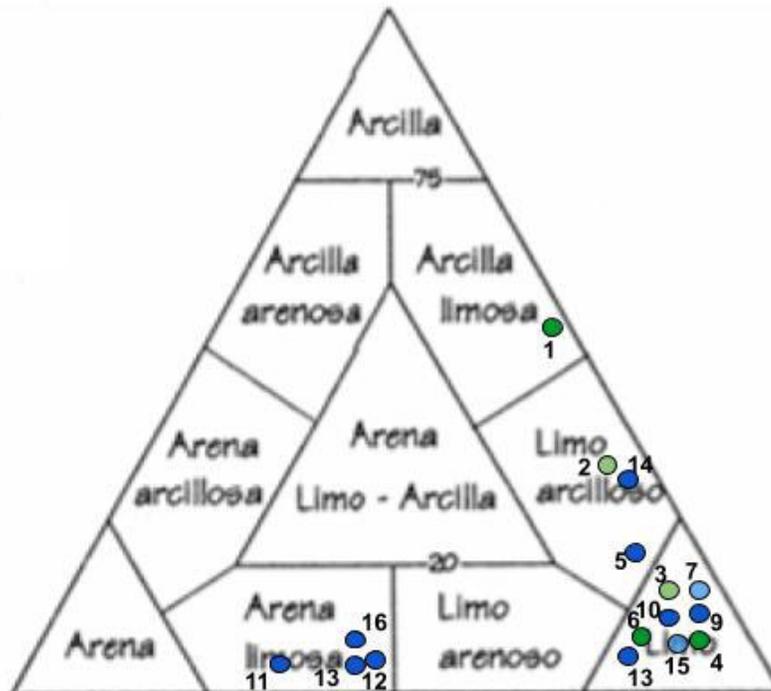


Fig. 8. Diagrama triangular de texturas de Shepard con los lagos muestreados del PNLM. Los números identifican los lagos de la Tabla 3. (En azul claro los lagos someros no

impactados, azul oscuro profundo no impactados, en verde claro los someros impactados y en verde oscuro los profundos impactados).

En la Tabla 5 se muestra la clasificación según Udden-Wentworth (1922) del tamaño medio de los sedimentos de los lagos muestreados en el PNLN con los valores obtenidos de la Ecuación 1. El tamaño medio más abundante es el limo medio. En los lagos San Lorenzo, Balantetic, San José y Patianú el tamaño medio corresponde a limo muy fino, mientras que, para Cinco Lagos, Pojoj y Kichail, el tamaño medio es arena muy fina.

Tabla 5. Clasificación del tamaño medio ($Mz\Phi$) de los sedimentos según Udden-Wentworth (1922) de los lagos muestreados en PNLN. Los lagos se muestran ordenados de acuerdo con la Tabla 1. (En verde claro los lagos someros impactados, en verde oscuro profundos impactados, en azul claro someros no impactados y azul oscuro profundos no impactados).

Lago	$Mz\Phi$	Clasificación
San Lorenzo	7.993	Limo muy fino
Balantetic	7.377	Limo muy fino
Chajchaj	5.852	Limo medio
Bosque Azul	5.765	Limo medio
San José	7.209	Limo muy fino
La Encantada	5.120	Limo medio
Esmeralda	5.803	Limo medio
Ensueño	5.068	Limo medio
Agua Tinta	5.774	Limo medio
Montebello	5.310	Limo medio
Cinco Lagos	3.669	Arena muy fina

Pojoj	3.978	Arena muy fina
Kichail	3.928	Arena muy fina
Patianú	7.433	Limo muy fino
Yalalush	5.7	Limo medio
Dos Lagos	4.284	Limo grueso

De acuerdo con los resultados de la moda, la clase más abundante es el limo grueso. En los lagos San Lorenzo, Balantetic y Bosque Azul corresponde a limo medio, mientras que los lagos en La Encantada, Ensueño y Dos Lagos la clase más abundante son las arenas muy finas (Tabla 6).

Tabla 6. Clasificación de la moda (en mm y en Φ) de los sedimentos según Udden-Wentworth (1922) de los lagos muestreados en PNL.M.(mm = tamaño de grano en milímetros, Φ = Tamaño de grano en phi). Los lagos se muestran ordenados de acuerdo con la Tabla 1. (En verde claro los lagos someros impactados, en verde oscuro profundos impactados, en azul claro someros no impactados y azul oscuro profundos no impactados).

Lago	mm	Φ	Clasificación
San Lorenzo	23.81	5.392	Limo medio
Balantetic	16.40	5.930	Limo medio
Chajchaj	55.13	4.181	Limo grueso
Bosque Azul	21.69	5.527	Limo medio
San José	9.37	6.738	Limo fino
La Encantada	66.44	3.912	Arena muy fina
Esmeralda	55.13	4.181	Limo grueso
Ensueño	66.44	3.912	Arena muy fina
Agua Tinta	50.22	4.316	Limo grueso

Montebello	55.13	4.181	Limo grueso
Cinco Lagos	140.10	2.835	Arena fina
Pojoj	127.60	2.970	Arena fina
Kichail	127.60	2.970	Arena fina
Patianú	31.50	4.989	Limo grueso
Yalalush	28.7	5.1	Limo medio
Dos Lagos	496.49	3.373	Arena muy fina

La clasificación de la selección según Folk y Ward (1957) determinada con los valores de la desviación estándar muestra que los sedimentos de los lagos son pobremente seleccionados; únicamente el lago Kichail es moderadamente seleccionado (Tabla 7).

Tabla 7. Clasificación de la selección ($\sigma_1\Phi$) de los sedimentos según Folk y Ward (1957) de los lagos muestreados en PNLM. Los lagos se muestran ordenados de acuerdo con la Tabla 1. (En verde claro los lagos someros impactados, en verde oscuro profundos impactados, en azul claro someros no impactados y azul oscuro profundos no impactados).

Lago	$\sigma_1\Phi$	Clasificación
San Lorenzo	1.935	Pobremente seleccionado
Balantetic	1.738	Pobremente seleccionado
Chajchaj	1.774	Pobremente seleccionado
Bosque Azul	1.487	Pobremente seleccionado
San José	1.516	Pobremente seleccionado
La Encantada	1.383	Pobremente seleccionado
Esmeralda	1.757	Pobremente seleccionado
Ensueño	1.351	Pobremente seleccionado

Agua Tinta	1.488	Pobrementemente seleccionado
Montebello	1.481	Pobrementemente seleccionado
Cinco Lagos	1.056	Pobrementemente seleccionado
Pojoj	1.021	Pobrementemente seleccionado
Kichail	0.978	Moderadamente seleccionado
Patianú	1.957	Pobrementemente seleccionado
Yalalush	1.6	Pobrementemente seleccionado
Dos Lagos	1.242	Pobrementemente seleccionado

En cuanto a la asimetría (Sk_i), la mayoría de los lagos (Chajchaj, La Encantada, Esmeralda, Ensueño, Montebello, Cinco Lagos, Pojoj, Yalalush, Dos Lagos) presenta la clasificación “muy positiva”, es decir, que la media está desplazada hacia tamaños más finos de la mediana de los sedimentos, esto se traduce en que la energía cinética media es mucho menor de lo normal evitando la remoción directa de los granos de tamaño más finos atrapados entre las partículas mayores; los lagos Balantetic, Bosque Azul, San José, Agua Tinta, Kichail y Patianú presentan asimetrías positivas, mientras que el lago San Lorenzo es simétrico (Tabla 8).

Tabla 8. Clasificación de asimetría (Sk_i) de los sedimentos según Folk y Ward (1957) de los lagos muestreados en PNLM. Los lagos se muestran ordenados de acuerdo con la Tabla 1. (En verde claro los lagos someros impactados, en verde oscuro profundos impactados, en azul claro someros no impactados y azul oscuro profundos no impactados).

Lago	Sk_i	Clasificación
San Lorenzo	-0.055	Simétrica
Balantetic	0.148	Asimetría positiva

Chajchaj	0.401	Asimetría muy positiva
Bosque Azul	0.273	Asimetría positiva
San José	0.200	Asimetría positiva
La Encantada	0.335	Asimetría muy positiva
Esmeralda	0.435	Asimetría muy positiva
Ensueño	0.325	Asimetría muy positiva
Agua Tinta	0.236	Asimetría positiva
Montebello	0.444	Asimetría muy positiva
Cinco Lagos	0.443	Asimetría muy positiva
Pojoj	0.325	Asimetría muy positiva
Kichail	0.273	Asimetría positiva
Patianú	0.233	Asimetría positiva
Yalalush	0.3	Asimetría muy positiva
Dos Lagos	0.452	Asimetría muy positiva

Según los valores de kurtosis (K_G) junto con la clasificación de agudeza, los lagos Balantetic, Kichail y Patianú son platicúrticos; Chajchaj, La Encantada, Esmeralda, Cinco Lagos, Pojoj y Dos Lagos presentan una kurtosis que corresponde a una agudeza mesocúrtica; San Lorenzo es muy platicúrtico, mientras que los lagos Bosque Azul, San José, Ensueño, Agua Tinta, Yalalush y Montebello son leptocúrticos (Tabla 9).

Tabla 9. Kurtosis (K_G) y clasificación de agudeza de los sedimentos según Folk y Ward (1957) de los lagos muestreados en PNLN. Los lagos se muestran ordenados de acuerdo con la Tabla 1. (En verde claro los lagos someros impactados, en verde oscuro profundos impactados, en azul claro someros no impactados y azul oscuro profundos no impactados).

Lago	K _G	Clasificación
San Lorenzo	0.665	Muy Platicúrtica
Balantetic	0.862	Platicúrtica
Chajchaj	0.977	Mesocúrtica
Bosque Azul	1.237	Leptocúrtica
San José	1.182	Leptocúrtica
La Encantada	1.040	Mesocúrtica
Esmeralda	0.945	Mesocúrtica
Ensueño	1.123	Leptocúrtica
Agua Tinta	1.134	Leptocúrtica
Montebello	1.269	Leptocúrtica
Cinco Lagos	1.012	Mesocúrtica
Pojoj	0.902	Mesocúrtica
Kichail	0.885	Platicúrtica
Patianú	0.740	Platicúrtica
Yalalush	1.2	Leptocúrtica
Dos Lagos	1.047	Mesocúrtica

En general, los parámetros granulométricos caracterizan a los lagos en 3 grupos con un corte a 67% de disimilitud. El Grupo 1 está formado por Kichail, Dos Lagos, Cinco Lagos y Pojoj. El Grupo 2 está conformado por San Lorenzo, Balantetic y Patianú y en el Grupo 3 se encuentran Chajchaj, Esmeralda, La Encantada, Ensueño, Montebello, Yalalush, San José, Bosque Azul y Agua Tinta (Fig. 9).

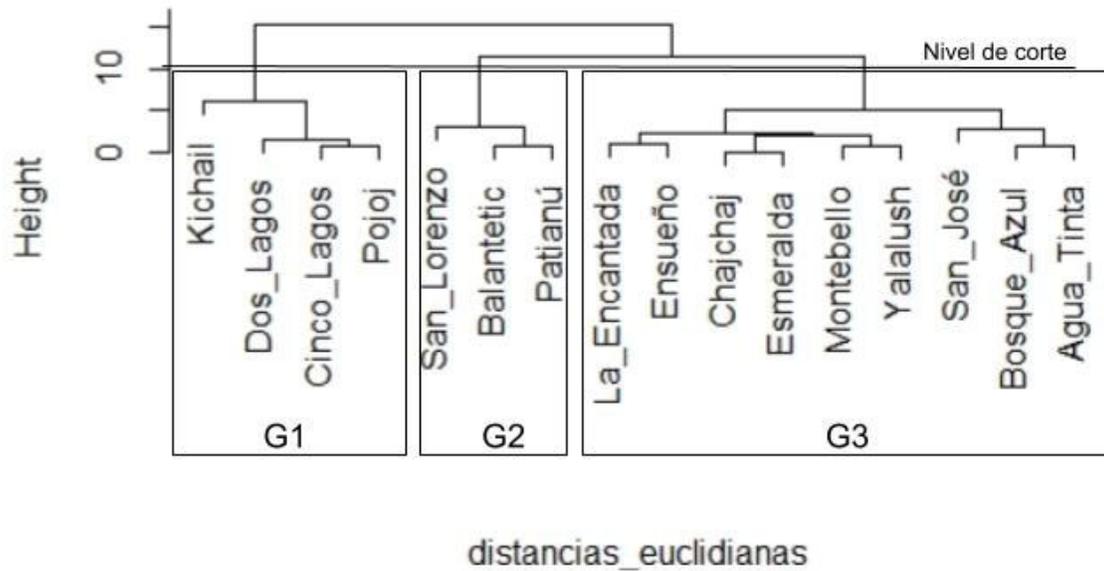


Fig. 9. Dendrograma de los parámetros granulométricos de los sedimentos de los lagos en estudio del PNLM.(G1= Grupo 1, G2= Grupo2, G3= Grupo 3).

Del análisis de componentes principales de los parámetros granulométricos, realizado con RStudio, se obtuvieron 2 componentes principales que explican el 80.5% de la variabilidad total. La varianza de los primeros 2 componentes principales es igual a 1.61 cumpliendo con el criterio de Kaiser (1974).

En la Tabla 10 se muestran las proporciones de los componentes principales CP1PG, CP2PG que son explicadas por los parámetros granulométricos. Se observa que el componente CP1PG es explicado mejor por las fracciones, tamaño medio y moda; el componente CP2PG recibe mayor peso por parte de la selección y la kurtosis.

Tabla 10. Matriz de las correlaciones estimadas a partir de la solución factorial entre los componentes principales (CP1PG y CP2PG) de los parámetros granulométricos.

Parámetros Granulométricos	CP1PG	CP2PG
Fracciones	0.545	-0.059

Tamaño medio ($Mz\Phi$)	0.538	0.062
Moda (Φ)	0.487	0.221
Selección($\sigma_1\Phi$)	0.217	0.591
Asimetría (Sk_1)	-0.331	0.457
Agudeza (K_G)	0.138	-0.621

En conjunto, el análisis de cúmulos con el resultado del ACP de los de los parámetros granulométricos, se observa que los lagos del Grupo 1 presentan mayores tamaños de grano para $Mz\Phi$ (arenas muy finas y limo grueso) y moda (Φ) (arena fina y muy fina) a diferencia de los Grupo 2 (limo muy fino a arena muy fina para $Mz\Phi$; limo medio y grueso para moda (Φ)) y Grupo 3 (limo medio y muy fino para $Mz\Phi$; limo fino y arena muy fina).

Los lagos del Grupo 1 presentan texturas correspondientes a arenas y limos, el Grupo 2 está dominado por limos y arcillas, el Grupo 3 por limos. Los grupos de lagos presentan diferentes clasificaciones de K_G , el Grupo 1 está conformado por lagos mesocúrticos y platicúrticos; el Grupo 2 por lagos platicúrticos y muy platicúrticos; el Grupo 3 por lagos meso y leptocúrticos (Fig. 10).

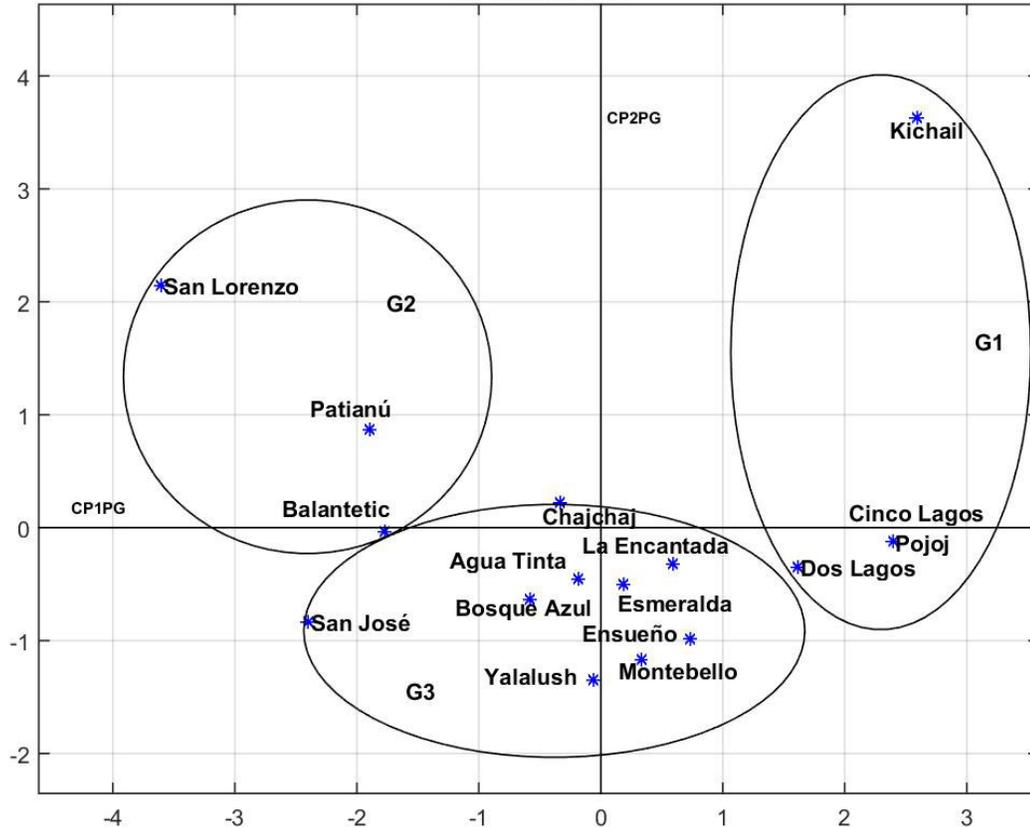


Fig. 10. Distribución de los lagos de estudio con respecto a los componentes principales CP1PG (eje X) y CP2PG (eje Y) con base en los parámetros granulométricos. (G1 = Grupo 1, G2 = Grupo 2, G3 = Grupo 3).

8.3 Materia orgánica (MO) y carbonatos sedimentarios (CO₃)

El porcentaje promedio de MO en los lagos en estudio es de $35.7 \pm 17.9\%$ variando desde los $19.9 \pm 5.0\%$ hasta los $85.7 \pm 2.1\%$ (Tabla 11), el valor mínimo se registró en San José y el valor máximo en Cinco Lagos (Fig. 11).

Tabla 11. Porcentaje promedio y desviación estándar del contenido de materia orgánica (MO) y de carbonatos (CO₃) en los sedimentos de los lagos muestreados del PNLM. [(MO(%) = porcentaje de materia orgánica, CO₃²⁻(%) = porcentaje de carbonatos)]. Los lagos se muestran ordenados de acuerdo con la Tabla 1. (En verde claro los lagos someros impactados, en verde oscuro profundos impactados, en azul claro someros no impactados y azul oscuro profundos no impactados).

Lago	MO (%)	CO ₃ (%)
San Lorenzo	22.8 ± 5.9	34.2
Balantetic	20.7 ± 1.1	34.4
Chajchaj	22.5 ± 0.6	44.2
Bosque Azul	42.1 ± 5.5	42.0
San José	19.9 ± 5.0	51.7
La Encantada	29.2 ± 12.7	66.2
Esmeralda	51.3 ± 22.2	61.3
Ensueño	24.5 ± 1.1	29.6
Agua Tinta	37.2 ± 11.0	63.1
Montebello	26.0 ± 0.0	8.3
Cinco Lagos	85.7 ± 2.1	74.1
Pojoj	21.0 ± 2.2	65.2
Kichail	54.1 ± 0.3	9.5
Patianú	22.7 ± 0.3	17.3
Yalalush	40.8 ± 8.3	27.5
Dos Lagos	50.6 ± 0.0	26.5

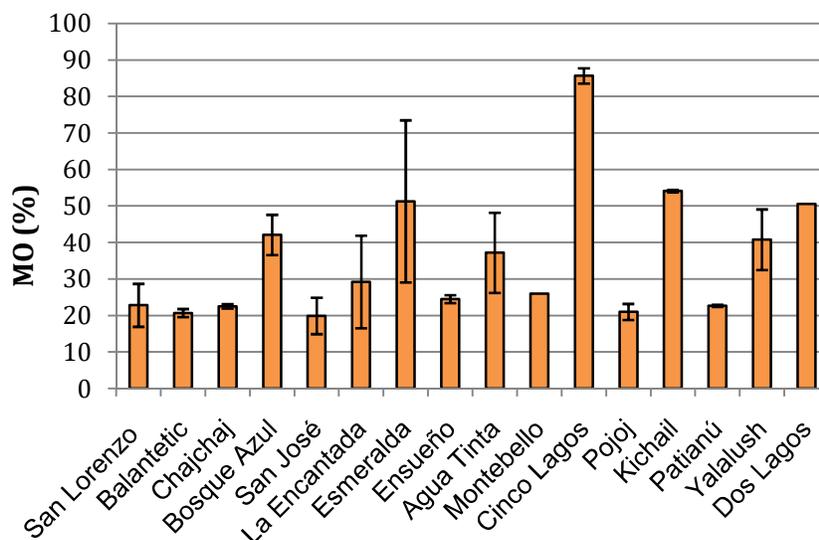


Fig. 11. Porcentaje promedio (± 1 d.e.) de materia orgánica (MO) en los sedimentos de los lagos en estudio. Los lagos se muestran conforme a la Tabla 1 ordenados en el sentido NW-SE.

El porcentaje de carbonatos varió desde los 8.3% hasta los 74.1% con un promedio de $40.9 \pm 20.9\%$ (Tabla 11); el valor mínimo se registró en Montebello y el valor máximo en Cinco Lagos (Fig. 12).

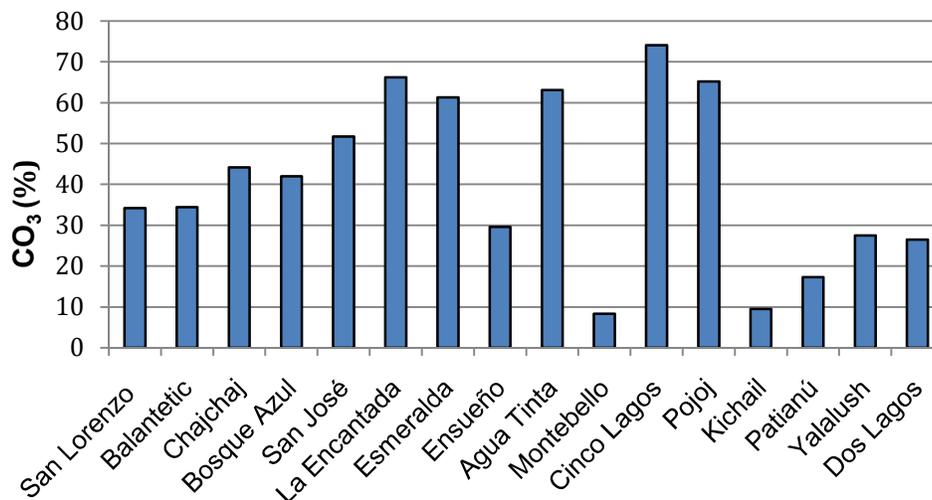


Fig. 12. Porcentaje de carbonatos (CO₃) en los sedimentos de los lagos en estudio. Los lagos se muestran conforme a la Tabla 1 ordenados en el sentido NW-SE.

8.4 Carbono, nitrógeno y azufre elementales en los sedimentos

Los porcentajes promedio de C, N y S elemental se presentan en la Tabla 12. El porcentaje promedio de C elemental en los lagos en estudio es de 10.7 ± 6.2 , el mínimo se localizó en Balantetic ($2.3 \pm 0.2\%$) y el máximo en Cinco Lagos ($22.9 \pm 0.1\%$) (Fig. 13). El contenido porcentual correspondiente a N elemental varió desde 0.7% hasta 2.2% , siendo Ensueño el que presentó el valor mínimo (0.7 ± 0.04) y Kichail el valor máximo ($2.2 \pm 0.06\%$); El contenido promedio de N elemental es de 0.9 ± 0.5 (Fig. 14). El contenido porcentual correspondiente a S elemental varió desde $0.2 \pm 0.01\%$ hasta $4.2 \pm 0.7\%$ con un promedio de 1.1 ± 1.2 , siendo Esmeralda el que presentó el valor mínimo y Dos Lagos el valor máximo (Fig. 15).

Tabla 12. Contenido de porcentaje promedio de carbono (C%), nitrógeno (N%) y azufre (S%) elementales de los sedimentos de los lagos en estudio del PNLM y relación C/N ajustada por la masa atómica (C/N*). Los lagos se muestran ordenados de acuerdo con la Tabla 1. (En verde claro los lagos someros impactados, en verde oscuro profundos impactados, en azul claro someros no impactados y azul oscuro profundos no impactados).

Lago	C (%)	N (%)	S (%)	C/N*
San Lorenzo	13.5 ± 0.5	0.8 ± 0.5	2.4 ± 1.6	19.6
Balantetic	2.3 ± 0.2	0.4 ± 0.0	0.3 ± 0.0	6.7
Chajchaj	6.9 ± 0.1	0.7 ± 0.1	2.1 ± 0.1	11.4
Bosque Azul	9.9 ± 0.1	1.0 ± 0.02	2.2 ± 0.1	11.5
San José	2.9 ± 0.2	0.5 ± 0.04	0.1 ± 0.1	6.7
La Encantada	13.5 ± 0.1	0.9 ± 0.6	2.5 ± 1.6	17.4
Esmeralda	7.9 ± 0.3	0.8 ± 0.0	0.2 ± 0.0	11.5
Ensueño	6.5 ± 0.2	0.7 ± 0.04	0.2 ± 0.1	10.8

Agua Tinta	7.1 ± 0.4	0.8 ± 0.04	0.3 ± 0.02	10.3
Montebello	8.8 ± 0.0	0.9 ± 0.0	0.9 ± 0.0	11.3
Cinco Lagos	22.9 ± 0.1	1.9 ± 0.1	0.6 ± 0.03	14.0
Pojoj	13.0 ± 0.11	0.7 ± 0.0	0.1 ± 0.02	21.5
Kichail	23.6 ± 0.7	2.2 ± 0.1	1.0 ± 0.01	12.4
Patianú	5.1 ± 0.1	0.5 ± 0.03	0.1 ± 0.1	11.8
Yalalush	12.4 ± 0.03	1.3 ± 0.02	0.2 ± 0.04	11.1
Dos Lagos	15.7 ± 0.3	1.1 ± 0.03	4.2 ± 0.7	16.6

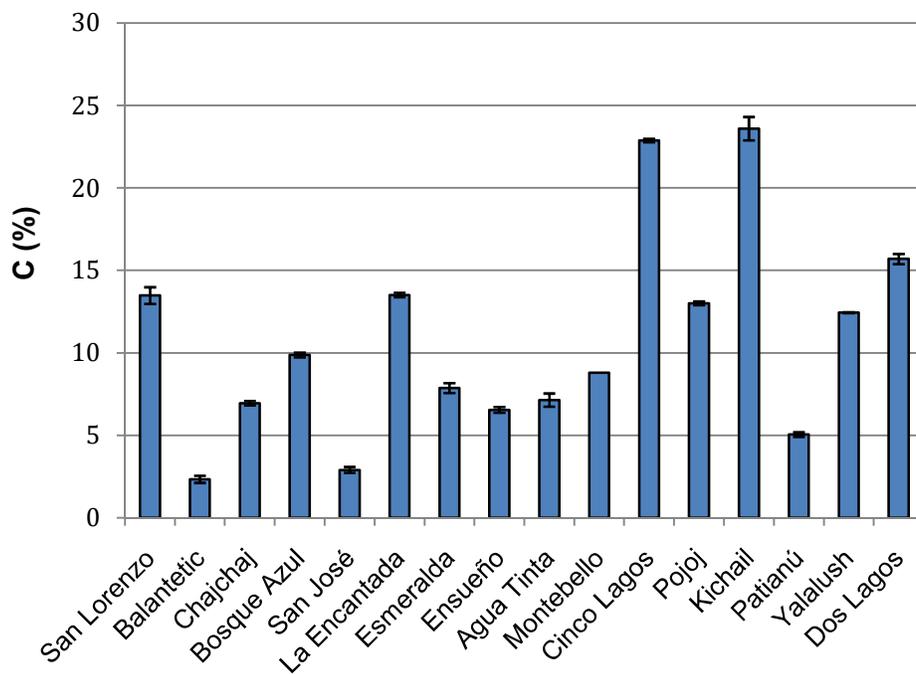


Fig. 13. Porcentaje promedio (± 1 d.e.) de C elemental en los sedimentos de los lagos en estudio del PNLM. Los lagos se muestran conforme a la Tabla 1 ordenados en el sentido NW-SE.

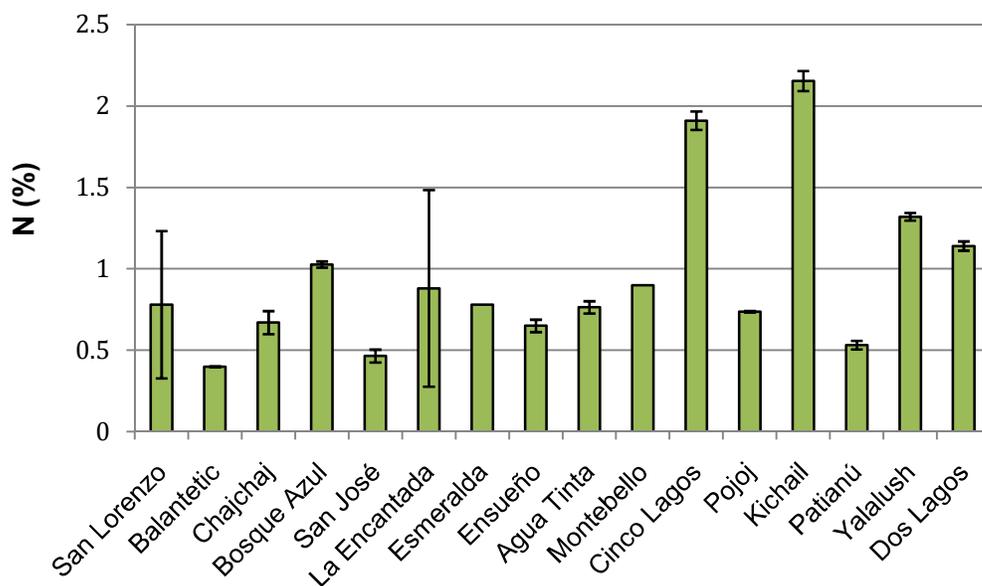


Fig. 14. Porcentaje promedio (± 1 d.e.) de N elemental en los sedimentos de los lagos en estudio. Los lagos se muestran conforme a la Tabla 1 ordenados en el sentido NW-SE.

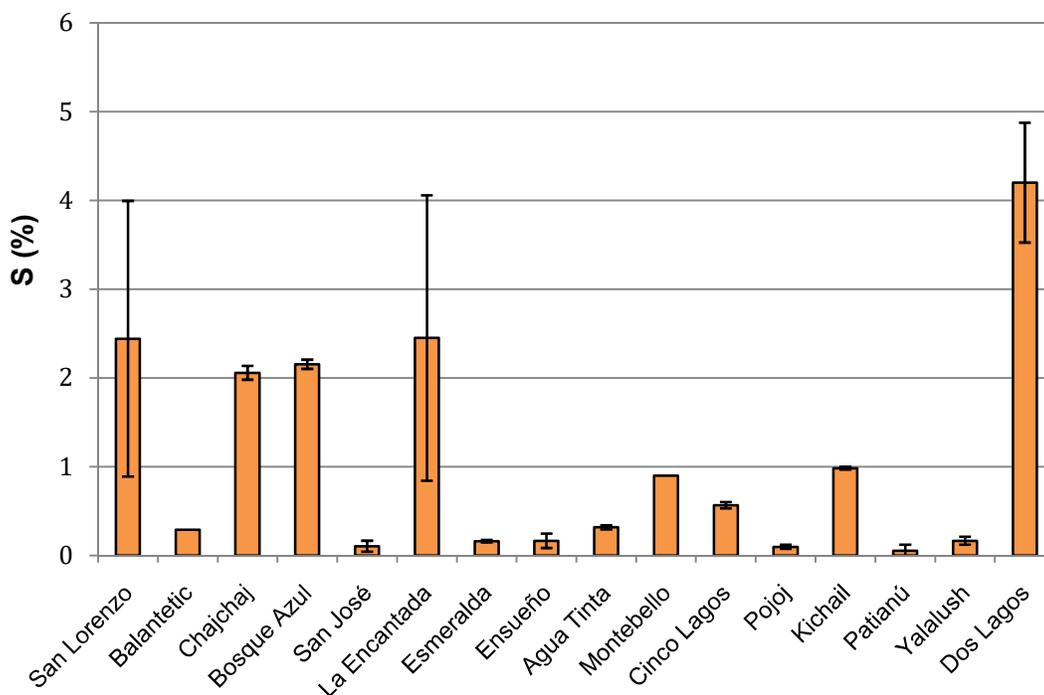


Fig. 15. Porcentaje promedio (± 1 d.e.) de S elemental en los sedimentos de los lagos en estudio. Los lagos se muestran conforme a la Tabla 1 ordenados en el sentido NW-SE.

En general, el contenido de MO, CO₃, C, N y S elemental caracteriza a los lagos en 3 grupos a un nivel de corte de disimilitud igual a 60%. El Grupo 1 está conformado por Cinco Lagos y Kichail; el Grupo 2 es conformado por Dos Lagos La Encantada, Bosque Azul, San Lorenzo y Chajchaj, mientras que el Grupo 3 lo conforman Balantetic, San José, Montebello, Esmeralda, Patianú, Yalalush, Pojoj, Ensueño y Agua Tinta (Fig. 16).

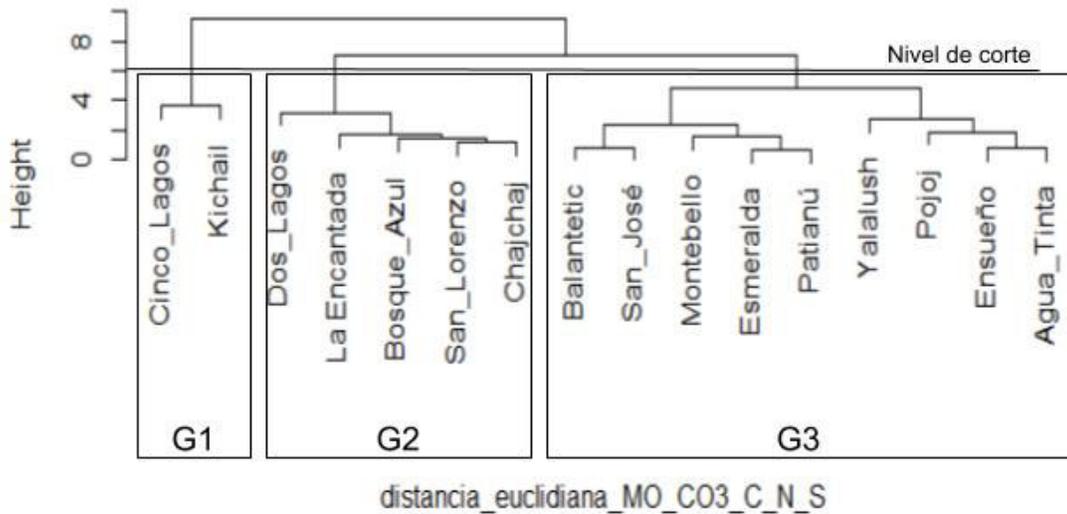


Fig. 16. Dendrograma de contenido de MO, CO₃, C elemental, N elemental y S elemental en los sedimentos de los lagos en estudio del PNLM. G1= Grupo 1, G2= Grupo2, G3= Grupo 3.

Del análisis de componentes principales del contenido de MO, CO₃, C, N, S elemental, realizado con RStudio, se obtuvieron 3 componentes principales que explican el 94.6% de la variabilidad total. La varianza de los primeros 3 componentes principales es igual a 0.88, cumpliendo con el criterio de Kaiser (1974).

En la Tabla 13 se muestran las proporciones de los componentes principales CP1C, CP2C y CP3C que son explicados por el contenido de MO, CO₃, C, N y S elemental. El componente CP1C es explicado mejor por la MO, el C y N elemental; el contenido de CO₃ y S elemental le dan mayor peso al componente CP2C; el CP3C recibe mayor peso de la MO y S elemental.

Tabla 13. Matriz de las correlaciones estimadas a partir de la solución factorial entre los componentes principales (CP1C, CP2C y CP3C) del contenido de MO, CO₃, C, N y S elemental.

Contenido en sedimento	CP1C	CP2C	CP3C
Materia orgánica (%)	0.541	0.255	0.552
Carbonatos (%)	0.045	0.785	-0.036
C elemental (%)	0.578	-0.068	0.012
N elemental (%)	0.581	-0.052	-0.274
S elemental (%)	0.185	-0.558	0.787

En conjunto, la clasificación obtenida del análisis de cúmulos y el ACP del contenido de MO, CO₃, C, N y S elemental, muestran que el contenido de MO, C y N elementales son las principales variables que marcan diferencia entre los lagos del Grupo 1 y el resto. El contenido de MO es mayor en el Grupo 1 (desde los 54.1 hasta 85.7%) que en el Grupo 2 y Grupo 3, en donde se tienen valores desde los 22.5 hasta 50.6% y un intervalo entre 19.9 y 51.3% respectivamente. El Grupo 1 presenta mayor contenido de C elemental (entre 22.9 y 23.6%), seguido por el Grupo 2 (desde los 6.9 hasta los 15.7%), el Grupo 3 es el que tiene un menor contenido (entre 2.3 y 12.4%). El contenido de N elemental del Grupo 1 es mayor que en los Grupos 1 y 2, se encuentra entre 1.9 y 2.2%, en los demás grupos desde 0.7 hasta 1.1% (Grupo 2) y entre 0.5 y 1.3% (Grupo 3). El Grupo 2 se encuentra separado del resto por un mayor contenido de S elemental (entre 2.1 y 4.2%), mientras que en los demás grupos los intervalos son desde 0.6 y 1.0% (Grupo 1) y entre 0.1 y 1.0% (Grupo 3) (Fig. 17).

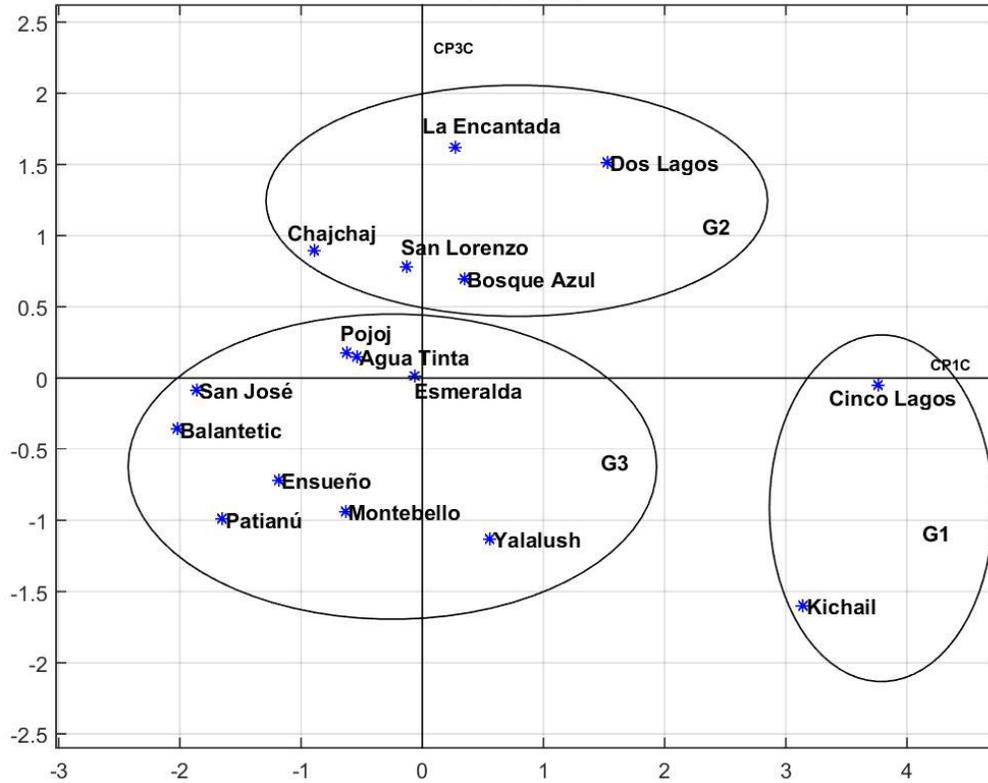


Fig. 17. Distribución de lagos en estudio con respecto a los componentes principales CP1C (eje X) y CP3C (eje Y) con base en contenido de MO, CO₃, C, N y S elemental. (G1 = Grupo 1, G2 = Grupo 2, G3 = Grupo 3).

La relación C/N promedio para el Grupo 1 es de 11.4 ± 0.9 , para el Grupo 2 resultó de 13.2 ± 3.2 y para el Grupo 3 de 9.7 ± 3.7 . Para la relación C/N ajustada por masa atómica (C/N*), el promedio en el Grupo 1 es de 13.2 ± 1.1 , de 15.3 ± 3.7 para el Grupo 2 y en el Grupo 3 resultó de 11.3 ± 4.3 (Tabla 14).

Tabla 14. Relación C/N para los grupos generados por el análisis de cúmulos y su origen potencial.

Grupo	C/N	C/N*	Origen
Grupo 1	11.4 ± 0.9	13.2 ± 1.1	Autóctono- Alóctono
Grupo 2	13.2 ± 3.2	15.3 ± 3.7	Autóctono- Alóctono
Grupo 3	9.7 ± 3.7	11.3 ± 4.3	Autóctono- Alóctono

De manera general, los lagos con mayor profundidad media ($> 29\text{m}$) presentan los mayores contenidos de CO_3 ($> 66.2\%$); los lagos más someros (profundidad media $< 5.5\text{ m}$) presentan un intervalo entre 34.4 y 61.3 % mientras que los lagos con profundidades medias entre los 9 y 26 m presentan contenidos variables de CO_3 desde 8.3 hasta 63.1 % (Fig. 18)

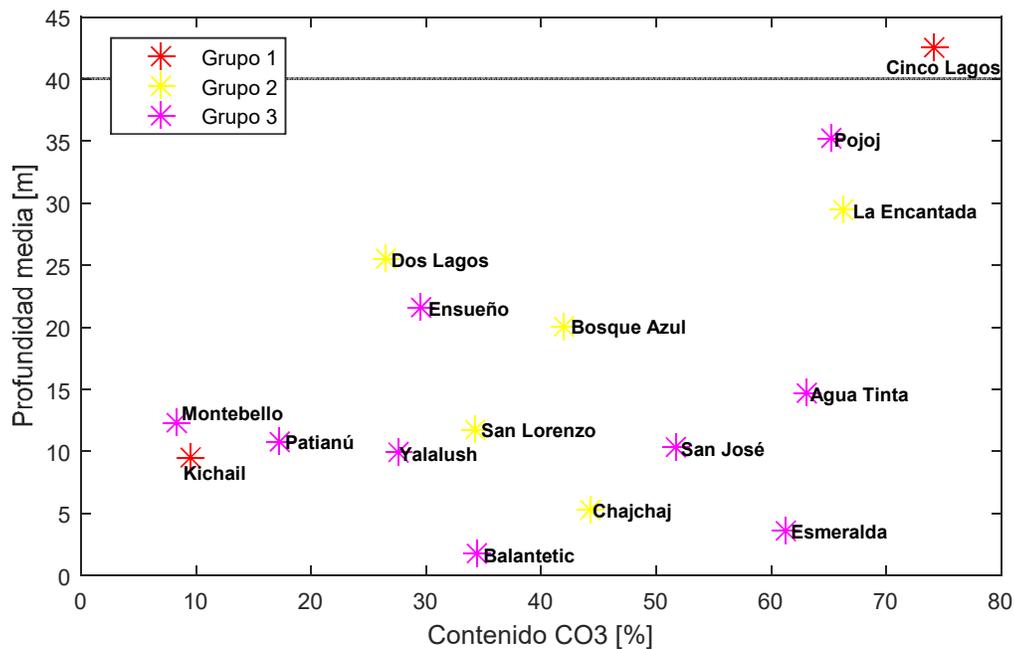


Fig. 18. Comparación entre el contenido de CO_3 y profundidad media de los grupos obtenidos en el dendrograma de MO, CO_3 y análisis elemental. (Grupo 1 en color rojo, Grupo 2 en color amarillo, Grupo 3 en color morado).

Para el contenido de MO en los sedimentos se observa que: a) En el Grupo 3, a excepción de San José y Balantetic, el contenido de MO aumenta a medida que disminuye la profundidad media, siendo Esmeralda el lago con mayor contenido de MO (51.3%); b) En el Grupo 1 y Grupo 2 (a excepción de La Encantada), el contenido de MO aumenta a medida que aumenta la profundidad siendo Cinco Lagos (Grupo 1) y Dos Lagos (Grupo 2) los lagos que presentaron mayor contenido de MO en sus grupos (85.7 y 50.6% respectivamente) (Fig. 19).

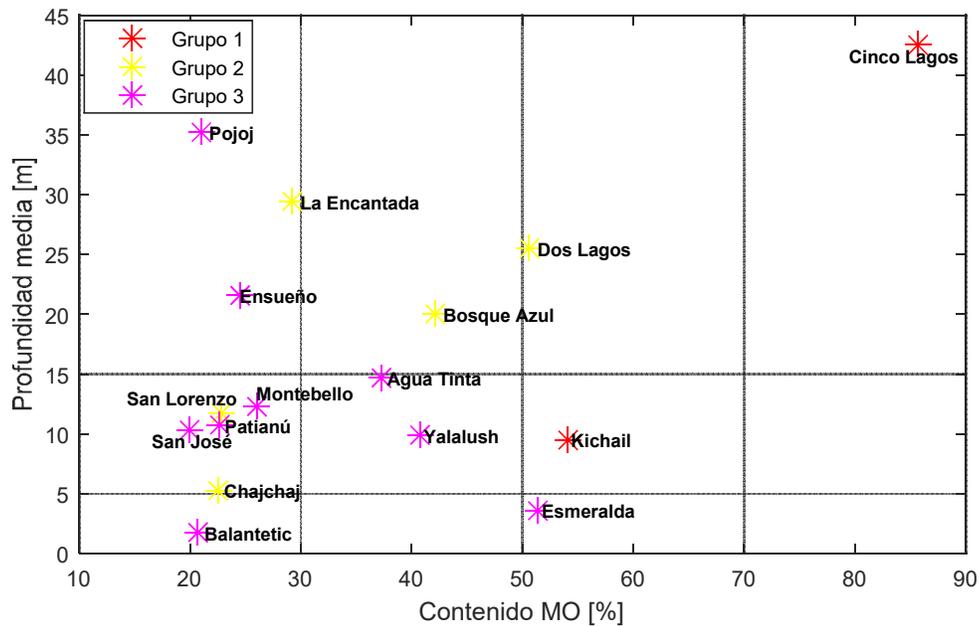


Fig. 19. Comparación entre el contenido de MO y profundidad media de los grupos obtenidos en el dendrograma de MO, CO₃ y análisis elemental. (Grupo 1 en color rojo, Grupo 2 en color amarillo, Grupo 3 en color morado).

En general, el contenido de C elemental aumenta en los lagos de los Grupos 2 y 3 conforme aumenta la profundidad media (a excepción de La Encantada, San José y Patianú donde lagos más someros presentan mayor contenido de C elemental); en el Grupo 1, el lago menos profundo (Kichail) presenta mayor contenido de C elemental que el lago más profundo (Cinco Lagos) (Fig. 20).

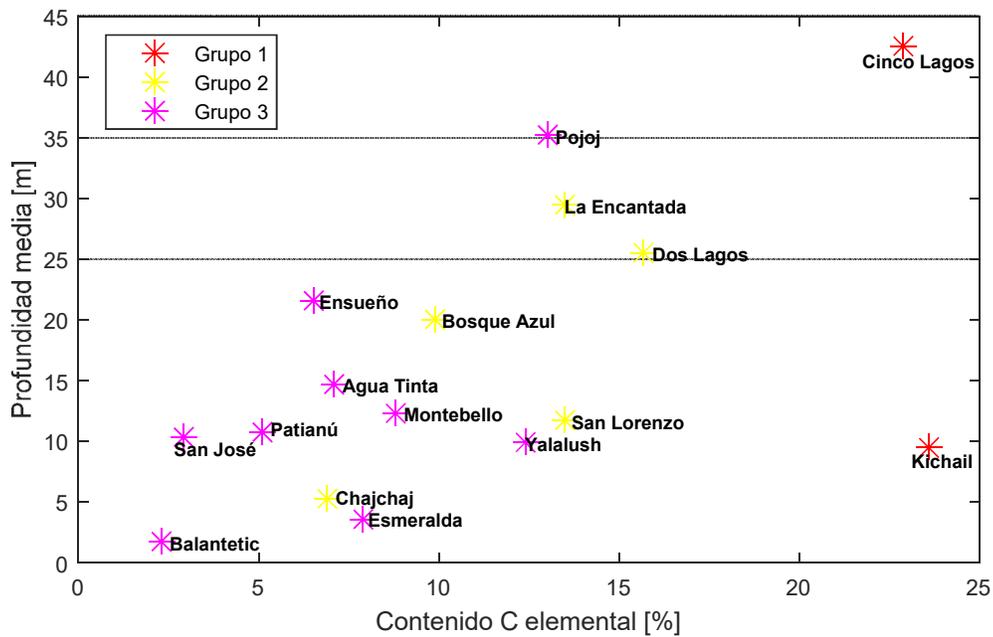


Fig. 20. Comparación entre el contenido de C elemental y profundidad media de los grupos obtenidos en el dendrograma de MO, CO₃ y análisis elemental. (Grupo 1 en color rojo, Grupo 2 en color amarillo, Grupo 3 en color morado).

Para el contenido de N elemental, se observa que: a) aumenta conforme aumenta la profundidad en los lagos del Grupo 2 (a excepción de La Encantada); b) aumenta en los Grupos 1 y 3 conforme disminuye la profundidad de los lagos (a excepción de Balantetic que, siendo el lago menos profundo, presenta el menor contenido de N elemental) (Fig. 21).

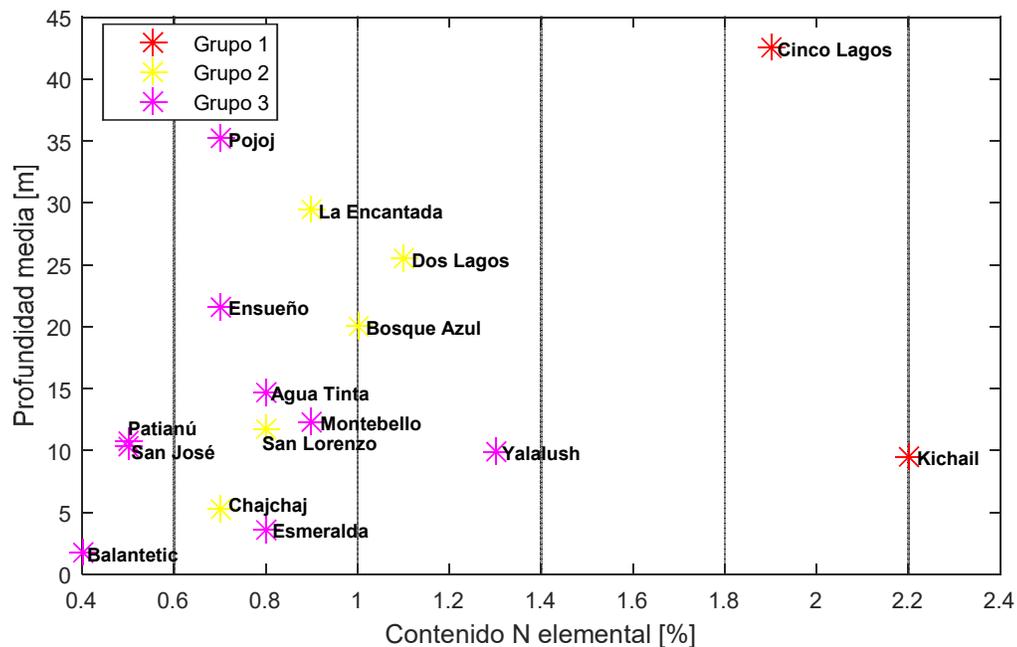


Fig. 21. Comparación entre el contenido de N elemental y profundidad media de los grupos obtenidos en el dendrograma de MO, CO₃ y análisis elemental. (Grupo 1 en color rojo, Grupo 2 en color amarillo, Grupo 3 en color morado).

De manera general, el contenido de S elemental presenta el mismo comportamiento que el N elemental con respecto a la profundidad, se observa que: a) aumenta conforme disminuye la profundidad de los lagos en los Grupos 1 y 3; b) aumenta conforme aumenta la profundidad de los lagos en el Grupo 2 (Fig. 22).

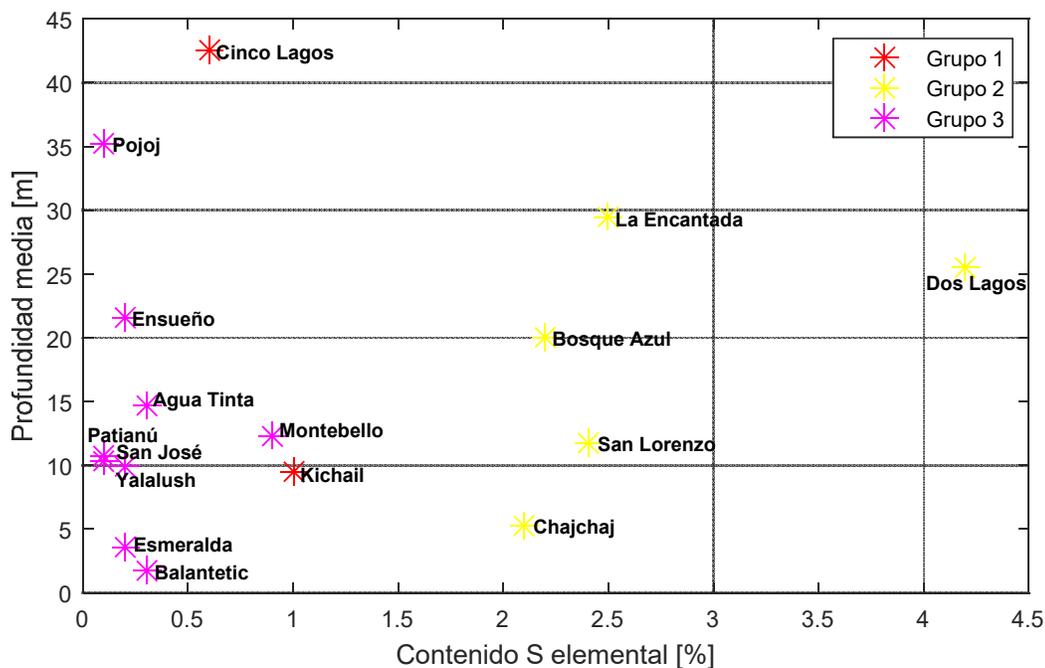


Fig. 22. Comparación entre el contenido de S elemental y profundidad media de los grupos obtenidos en el dendrograma de MO, CO₃ y análisis elemental. (Grupo 1 en color rojo, Grupo 2 en color amarillo, Grupo 3 en color morado).

8.5 Comparación entre los lagos.

En general, la distribución espacial de la clasificación *a priori* realizada por Alcocer *et al.* (2016) muestra que los lagos pertenecientes al sistema Tepancoapan, a excepción de San José, están impactados; en el sistema Candelaria no hay lagos impactados (Fig. 23).

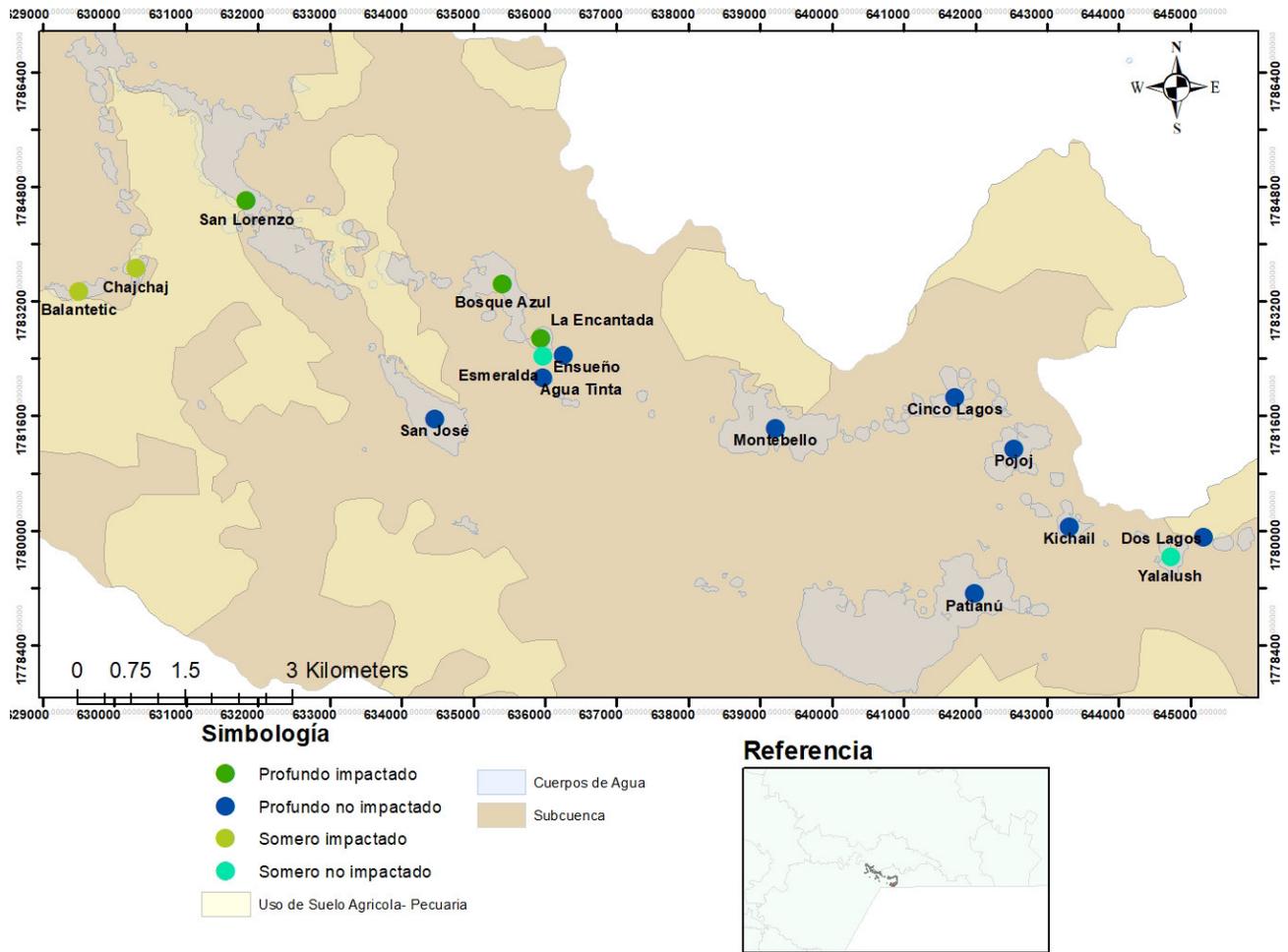


Fig. 23. Visualización espacial de la ubicación de los lagos en estudio. (En verde claro los lagos someros impactados, en verde oscuro profundos impactados, en azul claro someros no impactados y azul oscuro profundos no impactados).

En la Tabla 15 se muestra un resumen de las clasificaciones obtenidas con los análisis de cúmulos, los lagos Chajchaj y Bosque Azul están en los mismos grupos; Esmeralda, Ensueño, Agua Tinta y Montebello se encuentran asociados en todos los análisis de cúmulos.

Tabla 15. Tabla de las agrupaciones generadas por los análisis de cúmulos con base en. FQ= parámetros fisicoquímicos, GRA= parámetros granulométricos, ORG = contenido de MO, CO₃, C, N y S elemental. Los lagos se muestran ordenados de acuerdo con la Tabla 1. (En verde claro los lagos someros impactados, en verde oscuro profundos impactados, en azul claro someros no impactados y azul oscuro profundos no impactados).

Lago	FQ	GRA	ORG
San Lorenzo	G2	G2	G2
Balantetic	G3	G2	G3
Chajchaj	G3	G3	G2
Bosque Azul	G3	G3	G2
San José	G1	G3	G3
La Encantada	G2	G3	G2
Esmeralda	G1	G3	G3
Ensueño	G1	G3	G3
Agua Tinta	G1	G3	G3
Montebello	G1	G3	G3
Cinco Lagos	G1	G1	G1
Pojoj	G1	G1	G3
Kichail	G1	G1	G1
Patianú	G1	G2	G3
Yalalush	G1	G3	G3
Dos Lagos	G2	G1	G2

El resultado del análisis de cúmulos para los parámetros fisicoquímicos muestra que los lagos pertenecientes al Grupo 1 se localizan en el sistema Candelaria a excepción de San José; el Grupo 2 se encuentran en ambos sistemas, San Lorenzo en el sistema Tepancoapan y La Encantada y Dos Lagos en el sistema Candelaria; el Grupo 3 está conformado por lagos localizados en el sistema Tepancoapan (Fig. 24).

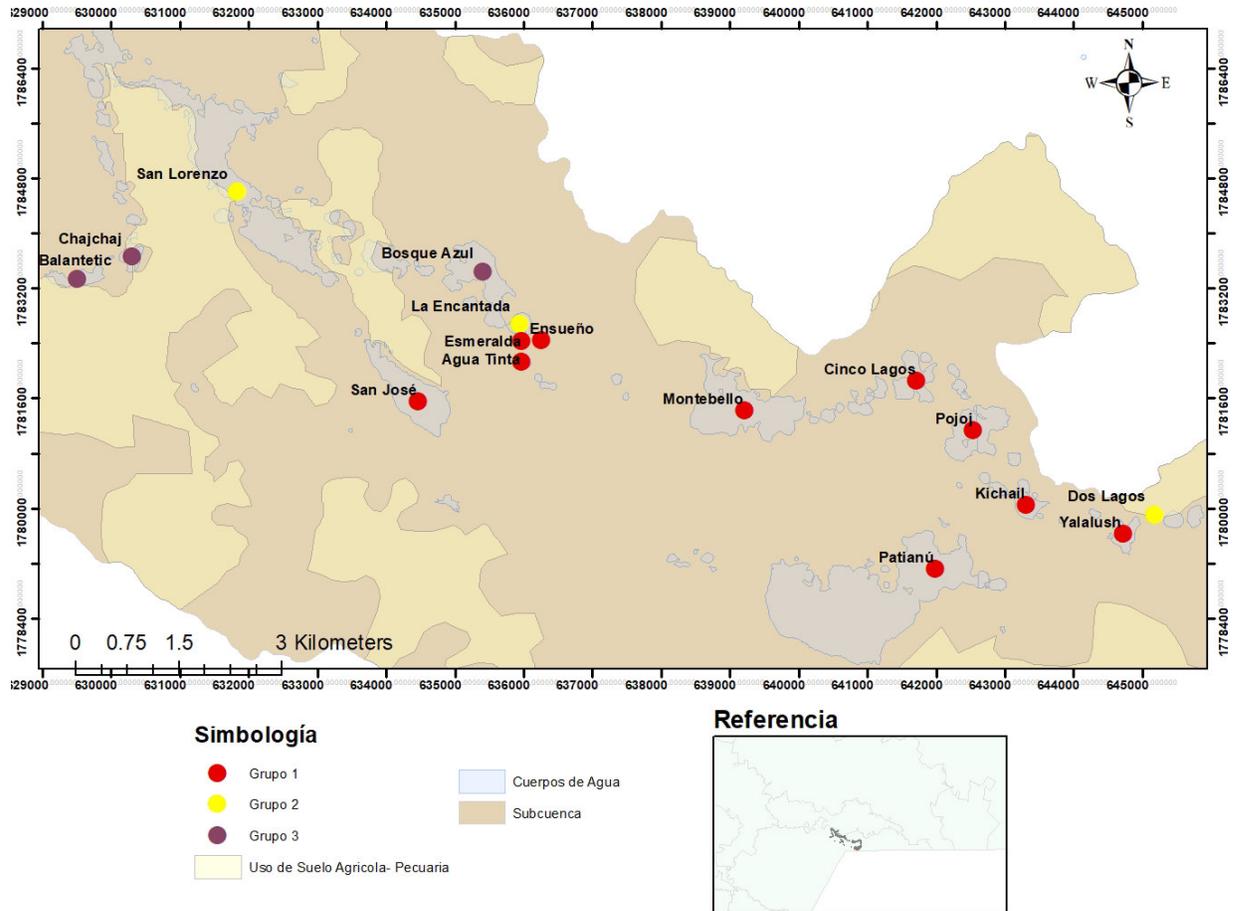


Fig. 24. Visualización espacial de la ubicación de los grupos formados por el dendrograma de parámetros fisicoquímicos. (Grupo 1 en color rojo, Grupo 2 en color amarillo, Grupo 3 en color morado).

Para la distribución espacial obtenida del análisis de cúmulos para los parámetros granulométricos (Fig. 25) se observa que los lagos pertenecientes al Grupo 1 se localizan al sur-sureste de la zona de estudio, en el sistema Candelaria; el Grupo 2 se encuentran en el sistema Tepancoapan, a excepción de Patianú; el Grupo 3 está conformado por lagos localizados en la parte central de la zona de estudio, con un lago en la parte sur-sureste (Yalalush) y otro perteneciente a la parte noroeste (Chajchaj) pertenecientes al sistema Candelaria y al sistema Tepancoapan.

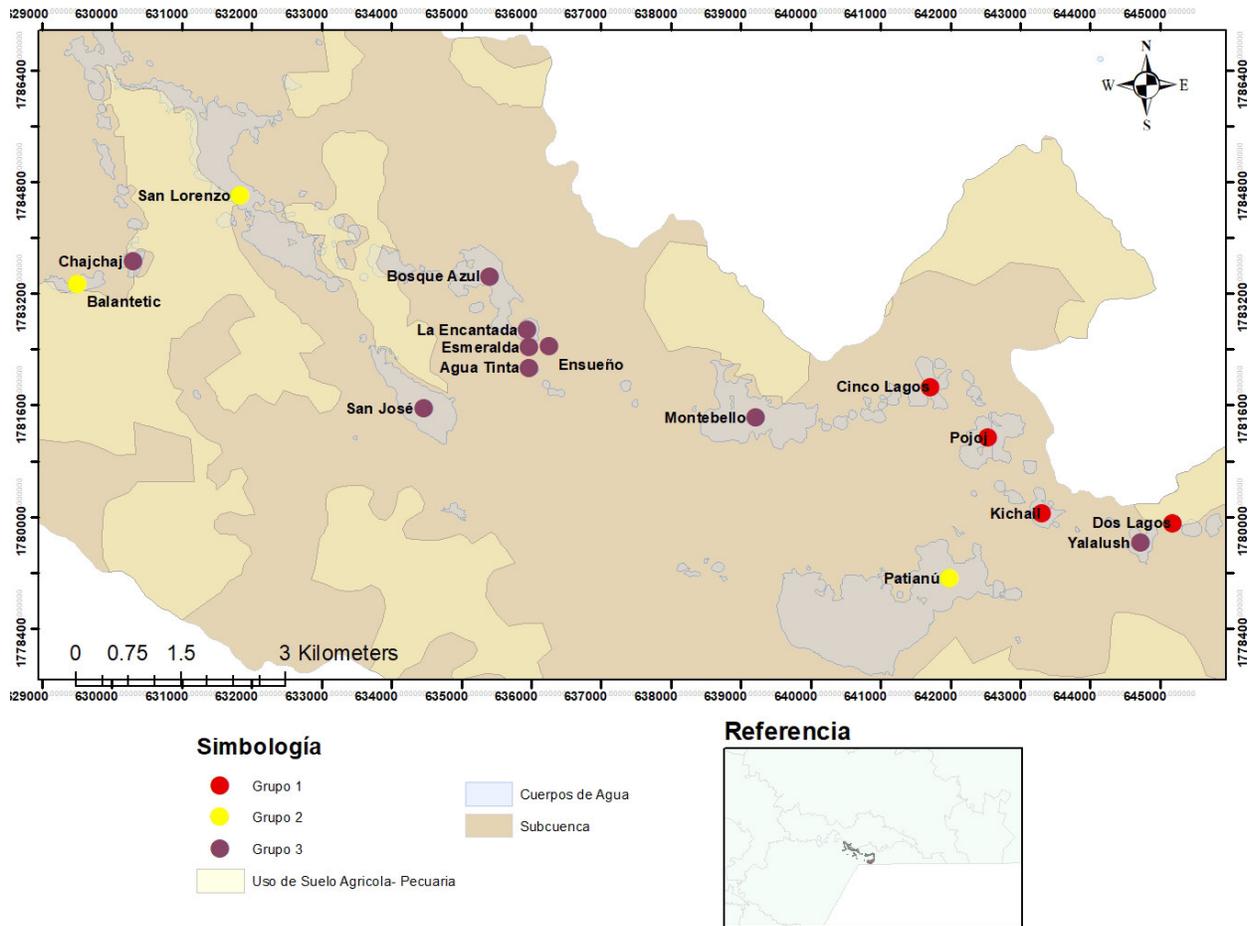


Fig. 25. Visualización espacial de la ubicación de los grupos formados por el dendrograma de parámetros granulométricos. (Grupo 1 en color rojo, Grupo 2 en color amarillo, Grupo 3 en color morado).

Para el dendrograma de los contenidos en sedimentos de MO, CO₃ C, N y S elemental se observa que los lagos del Grupo 1 se localizan en el sistema Candelaria; los del Grupo 2 se localizan en el sistema Tepancoapan, a excepción de Dos Lagos; el Grupo 3 se ubica en la parte central de la zona de estudio con un lago de la parte noroeste (Balantetic) y tres lagos de la parte sur-sureste (Pojoj, Patianú y Yalalush) (Fig. 26).

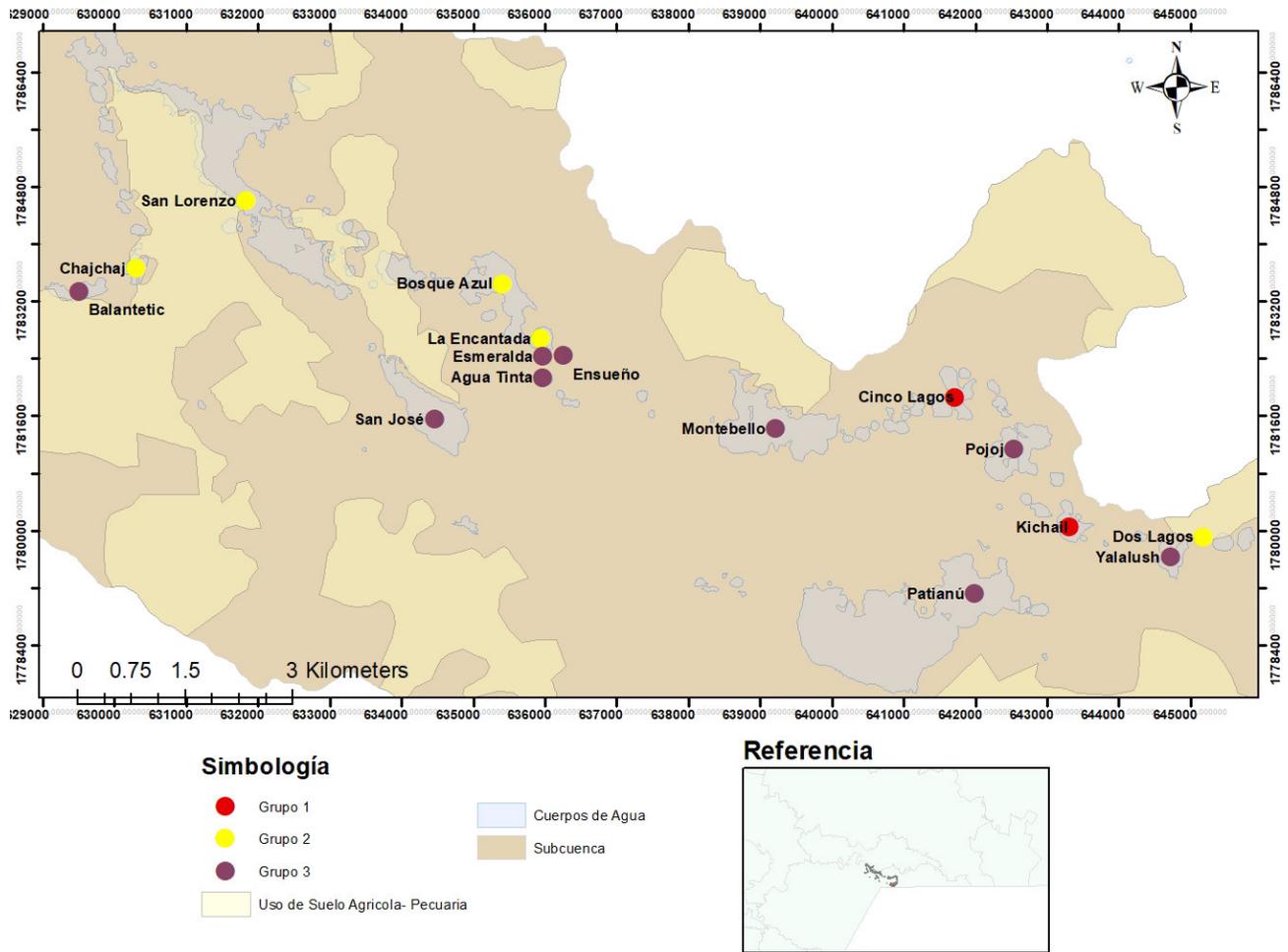


Fig. 26. Visualización espacial de la ubicación de los grupos formados por el dendrograma de MO, CO₃ y análisis elemental. (Grupo 1 en color rojo, Grupo 2 en color amarillo, Grupo 3 en color morado).

9. Discusión

De acuerdo con el análisis de cúmulos, en general los lagos se agrupan en impactados (de planicie) por un lado y los no impactados (de montaña) por el otro. Los lagos de montaña, a excepción de Dos Lagos y Patianú que comparten grupo con lagos impactados, se encuentran divididos en dos grupos.

En general, los valores de K_{25} son diferentes entre los lagos impactados y los no impactados, así como también entre lagos profundos impactados y lagos someros impactados. Los lagos impactados se relacionan con las descargas del río Grande y con el drenaje agrícola, siendo Balantetic y Chajchaj (someros impactados) los que presentan mayores valores de K_{25} y encontrándose próximos entre sí. Esto podría explicar los valores debido a un mayor aporte de sales disueltas (p.ej., nutrientes, SO_4) en el agua (Alcocer *et al.*, 2018; Mora *et al.*, 2017). La excepción lo constituye Dos Lagos, que es no impactado y posee altos valores de K_{25} , superando a los impactados. Esto puede ser explicado por su condición meromíctica, con un monimolimnion salino derivado de la entrada de agua subterránea salina (Alcocer *et al.*, 2017).

Otros parámetros fisicoquímicos importantes que diferencian los lagos impactados de no impactados son el contenido de OD y por ende el %SAT; en estas variables existen diferencias entre los lagos profundos impactados, los someros impactados y los no impactados (a excepción de Dos Lagos). Se esperaba que los lagos presentaran perfiles homogéneos de los parámetros fisicoquímicos durante la circulación, sin embargo, los lagos profundos impactados presentaron en agua de fondo contenido de oxígeno bajo, con tendencia a la anoxia. Probablemente, estos bajos valores sean resultado del consumo de oxígeno por el proceso de remineralización de la materia orgánica.

Del resultado del análisis de cúmulos de los parámetros granulométricos se observa que existen diferencias en el tipo de textura y tamaño medio, de acuerdo con la localización de los lagos en la zona de estudio. Los lagos del Grupo 1 se localizan al sur de la zona de estudio, son lagos de montaña, con dominancia de arenas limosas y tamaño medio entre limo grueso y arenas muy finas. Los lagos pertenecientes al Grupo 2 se localizan en el centro de la zona de estudio, se encuentran tanto lagos de montaña como de planicie, con

dominancia de limos (únicamente San José es limo arcilloso) y tamaño medio correspondiente a limo medio (San José presenta tamaño medio correspondiente a limo muy fino). Los lagos del Grupo 3 presentan una textura correspondiente a arcillas limosas y limo arcilloso con un tamaño medio de limos (Patianú es el único lago del Grupo 3 perteneciente a la parte sur-sureste de la zona de estudio).

En la Tabla 16 se comparan las texturas de diversos lagos kársticos. En general, los lagos kársticos presentan sedimentos predominantemente finos (limo-arcilla). Solo algunos muestran sedimentos arenosos, lo que concuerda con los lagos en estudio, donde la mayoría presenta sedimentos finos y pocos arenosos.

Tabla 16. Texturas de sedimentos de lagos kársticos.

Nombre	País	Textura	Referencia
Amatitlán	Guatemala	Limo arcilloso	Pérez <i>et al.</i> , 2010
Atitlán	Guatemala	Limo arcilloso	
Güija	Guatemala	Limo arcilloso	
Atescatempa	Guatemala	Limo arcilloso	
Oquevis	Guatemala	Limo arcilloso	
Salpetén	Guatemala	Limo arcilloso	
Petén Itzá	Guatemala	Limo arcilloso	
Sacpuy	Guatemala	Limo arcilloso	
La Gloria	Guatemala	Limo arcilloso	
San Diego	Guatemala	Limo arcilloso	
Las Pozas	Guatemala	Limo arcilloso	
Petexbatún	Guatemala	Limo arcilloso	
El Rosario	Guatemala	Limo arcilloso	
San José Aguilar	México	Arenoso y limo arcilloso	
Sabanita	México	Arenoso y limo arcilloso	
Chacan-Bata	México	Limo arcilloso	
Chacan-Lara	México	Limo arcilloso	

Jobal	México	Limo arcilloso	
San Francisco Mateos	México	Limo arcilloso	
La Misteriosa	México	Arenoso y limo arcilloso	
Cayucón	México	Limo arenoso	
Yalahau	México	Limo arcilloso	
Cobá	México	Arena limosa	
Percile	Italia	Limoso	Bazzanti <i>et al.</i> , 1998
Grupo 1	México	Arena limosa	Presente trabajo
Grupo 2	México	Arcilla limosa y limo arcilloso	
Grupo 3	México	Limoso	

Es muy probable que la diferencia en el tipo de textura y tamaño medio de los sedimentos entre los lagos de planicie y los de montaña se deba a que los materiales que llegan a los lagos de planicie están más trabajados y tienen más tiempo erosionándose, mientras que en los lagos de montaña los sedimentos pasen menos tiempo desde que se generaron hasta su depósito en el fondo de los lagos.

El parámetro granulométrico que marca la diferencia entre los lagos en estudio es la K_G ; los lagos pertenecientes a la parte sureste de la zona de estudio (Grupo 1) son meso y platicúrticos; los lagos pertenecientes a la parte noroeste de la zona de estudio (Grupo 2) varían de platicúrticos a muy platicúrticos. En la porción central de la zona de estudio (Grupo 3) se encuentran lagos mesocúrticos y leptocúrticos. A excepción de Kichail (Grupo 1) y Patianú (Grupo 3), los lagos no impactados tienen K_G correspondiente de mesocúrticos a leptocúrticos lo que significa una distribución de sedimento cercano al tamaño medio. Los lagos impactados presentan K_G platicúrticas y muy platicúrticas, indicando que los sedimentos presentes pueden ser resultado de una mezcla de 2 o más fuentes de sedimento, tanto autóctono como alóctono (Marenssi, 2019). De igual manera, los sedimentos de los lagos pertenecientes a la porción sureste de la zona de estudio pueden ser resultado de una mezcla de 2 o más fuentes con tamaño de grano más grueso.

En general, existen diferencias en el contenido de MO entre los lagos impactados y no impactados. Los lagos profundos impactados presentan mayor cantidad de MO que en los someros impactados. Los lagos San Lorenzo, Bosque Azul y La Encantada poseen condiciones de poco oxígeno o anoxia lo que favorece la preservación de la MO ya que no existen las condiciones para oxidarla. En el caso de los lagos someros impactados, se espera que exista una circulación de MO en toda la columna de agua, evitando la caída y el depósito de ésta en el sedimento. A excepción de La Encantada y Bosque Azul, los lagos de planicie contienen menor cantidad de MO que los lagos de montaña posiblemente debido a dos condiciones:

- a) A que la entrada de MO alóctona en los lagos de montaña sea mayor que la MO autóctona en los lagos de planicie;
- b) A que la MO alóctona que llega a los lagos de montañas sea más resistente a los procesos de oxidación que la MO presente en los lagos de planicie.

También existe diferencia entre los lagos de montaña, ya que los someros contienen mayor cantidad de MO que los profundos; esto podría deberse, a su vez, a que a) en los lagos profundos es mayor la oxidación de la MO en comparación con los someros y b) que la cantidad de MO que llega a los lagos profundos sea menor. Comparados con otros lagos kársticos, los lagos en estudio presentan mayor contenido de MO en sedimento (Tabla 17).

El contenido de CO_3 en los lagos en estudio del PNLN es mayor que otros lagos kársticos ubicados en la península de Yucatán, a pesar de que ambas zonas son de composición similar; sin embargo, existen lagos, como, por ejemplo, el lago Percil en Italia, que presenta contenido de CO_3 similar a los lagos profundos no impactados (Tabla 16).

Existen diferencias en el contenido de CO_3 dependiendo de la ubicación del cuerpo acuático: los lagos ubicados en la porción central de la zona de estudio presentan mayor contenido de CO_3 , los cuales (a excepción de La Encantada) son no impactados; los lagos impactados ubicados en la parte noroeste presentan una cantidad mayor de CO_3 que los lagos no impactados localizados en la parte sureste (a excepción de Cinco Lagos y Pojoj). Las diferencias en el contenido de CO_3 entre los lagos no impactados de la zona central y

los impactados de la porción noroeste podrían estar relacionadas con la productividad primaria, procesos de respiración y agotamiento de O₂ que ocasiona una disolución de los carbonatos en los lagos impactados (Fregenal y Meléndez, 2010). Las diferencias entre los lagos no impactados de las zonas centrales y surestes podrían estar relacionadas con el contenido de S elemental, ya que se observa que los lagos con mayores contenidos de S elemental presentan menor contenido de CO₃.

Tabla 17. Concentración de MO y CO₃ sedimentarios en lagos kársticos. (MO = materia orgánica, CO₃= carbonatos). (Se dan los promedios de los grupos de lagos generados en el análisis de cúmulos).

Nombre	País	MO (%)	CO ₃ (%)	Referencia
Izabal	Guatemala	3.5	0.54	Pérez et al., 2008
Petén Itza		10.2	2.59	
Laguna Perdida		17.7	0.11	
Yaxha		6.8	0.35	
Macanché	México	15.8	6.04	
Percile	Italia	11.2	46.0	Bazzanti <i>et al.</i> , 1998
Grupo 1	México	69.9 ± 22.3	41.8 ± 45.7	Presente trabajo
Grupo 2		33.4 ± 12.4	42.6 ± 14.9	
Grupo 3		29.3 ± 10.9	39.8 ± 21.1	

El contenido de C y N elemental (%), en general, es menor en lagos impactados que en los no impactados de la parte sureste de la zona de estudio. Los lagos someros impactados presentan un menor contenido de C y N en comparación con los profundos impactados. Por su localización, se esperaría que los lagos someros impactados presentaran un mayor contenido de N, debido a su cercanía con la descarga del Río Grande que viene de Comitán cargado de desechos provenientes de la agricultura (Mora *et al.*, 2017). Probablemente el N proveniente de estas descargas podría estar siendo aprovechado por el fitoplancton de los lagos someros impactados, ya que se reconoce que el N es

biolimitante y su concentración está relacionada con la existencia de vida (Roldán y Ramírez, 2008; Ramos-Higuera *et al.*, 2008). Los lagos no impactados pertenecientes a la zona sureste presentan los contenidos más elevados de C y N elemental. Al igual que en los lagos impactados, Yalalush (somero no impactado) presenta una menor cantidad de C elemental que los lagos profundos no impactados.

De manera general, los lagos ubicados en la parte sureste (de montaña) contienen mayor cantidad de C y N elementales que los lagos ubicados en la parte noroeste (de planicie). Esto puede ser debido a que exista un aporte externo de C y N, proveniente de las aguas subterráneas o de actividades agrícolas aledañas a estos lagos (Alvarado 2017; INEGI 2000).

En los cuerpos de agua, la MO autóctona es rica en compuestos proteicos de bajo peso molecular (ricos en N) y la MO autóctona terrestre está enriquecida en materiales húmicos, con un peso molecular elevado (rica en C), por eso, las proporciones $C/N < 10$ indican un origen autóctono, C/N entre 10 y 20 indican un origen mixto (autóctono y alóctono) y $C/N > 20$ indican un origen alóctono (Meyers y Ishiwatari, 1993; Pisanty y Caso, 2006).

En general, se distingue que los lagos pertenecientes a la zona sureste presentan una relación C/N ajustada por masa atómica (C/N^*) que corresponde a un origen mixto (autóctono y alóctono). Estos lagos presentan un alto contenido de N elemental, por lo que el alto contenido de C elemental supone que proviene de fuentes terrestres, en particular, del bosque. Los lagos ubicados en la parte noroeste de la zona de estudio presentan MO de origen tanto autóctono (Balantetic) como mixto (San Lorenzo, Bosque Azul, Chajchaj y La Encantada) con valores bajos de N elemental con respecto al contenido de dicho elemento en los lagos ubicados en la parte sureste posiblemente debido a su consumo por el fitoplancton. Los lagos no impactados ubicados en la parte central presentan MO de origen autóctono (San José) como mixto (Agua Tinta, Ensueño, Montebello, Esmeralda) con las relaciones de $C/N^* < 11.9$.

Los lagos impactados y no impactados difieren en el contenido de S. A excepción de Dos Lagos, los lagos impactados muestran un mayor porcentaje. Esto podría asociarse al aporte del Río Grande de Comitán que conduce aguas residuales provenientes del

poblado de Comitán. Dos Lagos es el lago que contiene la mayor cantidad de S elemental debido a que el agua subterránea que lo alimenta es rica en yeso (Alcocer, 2017). En general, los lagos en estudio del PNLM contienen una mayor cantidad de C, N y S elemental que otros lagos kársticos (Tabla 18).

Tabla 18. Contenido de C, N y S elemental de lagos kársticos. ND = No hay dato. Grupo 1, 2 y 3: grupos generados por el análisis de cúmulos.

Nombre	País	C (%)	N (%)	S (%)	Referencia
Amatitlán	Guatemala	1.9	1	1.5	Pérez <i>et al.</i> , 2010
Atitlán	Guatemala	10.8	0.1	0.2	
Güija	Guatemala	2	0.3	0.2	
Atescatempa	Guatemala	2.4	0.3	<0.1	
Oquevis	Guatemala	10.1	1	0.2	
Salpetén	Guatemala	15.5	1	0	
Petén Itzá	Guatemala	13	0	0.4	
Sacpuy	Guatemala	16.7	1.8	1.1	
La Gloria	Guatemala	7.9	0.9	0.5	
San Diego	Guatemala	20	1.8	0.4	
Las Pozas	Guatemala	16	1.2	0	
Petexbatún	Guatemala	10.1	0.5	0	
El Rosario	Guatemala	28.7	2.7	0	
San José Aguilar	México	14.9	0.9	0	
Sabanita	México	4.3	0.4	0	
Chacan-Bata	México	15.8	1.1	0	
Chacan-Lara	México	11	1.1	0	
Jobal	México	6.5	0.6	0	
San Francisco Mateos	México	17.7	1.3	1.4	
La Misteriosa	México	15.7	1.7	1.9	
Cayucón	México	9.8	1	0.1	
Yalahau	México	9	1.1	0	
Cobá	México	14.9	0.4	0	

Percile	Italia	6.5	0.47	ND	Bazzanti <i>et al.</i> , 1998
Grupo 1	México	23.2 ± 0.5	2.1 ± 0.2	0.8 ± 0.3	Presente trabajo
Grupo 2	México	11.9 ± 3.5	0.9 ± 0.2	2.7 ± 0.9	
Grupo 3	México	7.3 ± 3.7	0.7 ± 0.3	0.3 ± 0.2	

10. Conclusiones

Se encontraron diferencias en las características de los sedimentos y de agua de fondo entre los lagos impactados y los no impactados, así como también entre los lagos de planicie y los de montaña del PNLM.

Con base en el agua de fondo, las variables más importantes que diferencian los lagos son la K_{25} , el OD y el %SAT. Los lagos de planicie/impactados presentan mayor conductividad eléctrica y con una fuerte tendencia a la anoxia debido al aporte que reciben de la cuenca de drenaje de sales disueltas y a procesos de remineralización de la materia orgánica, respectivamente.

En relación con los parámetros granulométricos, la ubicación geográfica de los lagos juega un papel importante en su clasificación. El tamaño de grano se incrementa en dirección NW-SE identificando arcillas y limos muy finos en el NW (planicie), limos medios y muy finos en la parte central y arenas y limo grueso en la parte SE (montaña). Así mismo, los valores de K_G indican que tanto en la parte NW como en la parte SE, los sedimentos presentes son resultado de una mezcla de dos o más fuentes de aporte de sedimentos.

El contenido de MO es mayor en los lagos de montaña que en los lagos de planicie a excepción de La Encantada y Bosque Azul. Así mismo, existen diferencias entre los lagos de montaña; los lagos pertenecientes a la zona SE presentan mayor contenido de MO que los ubicados más hacia la parte central.

La proporción C/N mostró que en los lagos de montaña ubicados en la parte SE predomina la MO de origen mixto (autóctono y alóctono), mientras que en los lagos de la parte NW, la MO tiene un origen autóctono y mixto. Los lagos de montaña pertenecientes a la parte central presentan MO de origen autóctono.

Existe un mayor aporte de S elemental en los lagos de planicie/impactados que en los lagos de montaña/no impactados.

De la relación entre la profundidad media y la clasificación realizada para el contenido de MO, CO_3 , C, N y S elemental se tiene que: a) hay mayor contenido de MO y C elemental

en los lagos más someros de los Grupos 2 (San Lorenzo, Chajchaj, Bosque Azul, La Encantada y Dos Lagos) y 3 (Balantetic, San José, Esmeralda, Ensueño, Agua Tinta, Montebello, Pojoj, Patianú y Yalalush), mientras que para el Grupo 1 (Cinco Lagos y Kichail) hay mayor MO y C elemental conforme aumenta la profundidad media; b) El contenido de CO_3 aumenta conforme aumenta la profundidad media; c) Hay mayor contenido de N elemental en los lagos profundos del Grupo 2 (San Lorenzo, Chajchaj, Bosque Azul, La Encantada y Dos Lagos), mientras que para los Grupos 1 (Cinco Lagos y Kichail) y 3 (Balantetic, San José, Esmeralda, Ensueño, Agua Tinta, Montebello, Pojoj, Patianú y Yalalush) hay un menor contenido de N elemental en los lagos profundos.

Dos Lagos, debido a su condición meromítica, se asoció a los lagos de planicie/impactados. Sin embargo, el contenido de MO, C, N y S en Dos Lagos supera los valores reportados para los lagos impactados.

Los lagos de planicie/impactados y los de montaña/no impactados ubicados en la zona de transición (parte central) presentan características híbridas mostrando cierto grado de afectación por las actividades antrópicas, haciendo evidente el avance del deterioro de los lagos en Montebello y con ello la necesidad de mayor estudio y planes de conservación del lugar.

11. Literatura

- Alcocer J, Oseguera L, Sánchez G, González C, Martínez J, González R, 2016. Bathymetric and morphometric surveys of the Montebello Lakes, Chiapas. *Journal of Limnology* 75: 56-65.
- Alcocer J, Oseguera L, Escobar E, 2017. Contenido de carbono elemental en sedimentos lacustres de un conjunto de lagos tropicales con distinto estado trófico. Programa Mexicano del Carbono, estado actual del ciclo del carbono y sus interacciones en México: 357-365.
- Alcocer J, 2017. Mexican meromictic lakes: What we know so far?. En: Gulati R, Degermendzhy A, Zadereev E (eds.). *Ecology of Meromictic Lakes*. Springer International Publishing: 353-375.
- Alcocer J, Merino-Ibarra M, Oseguera LA, Escolero O, 2018. Anthropogenic impact on tropical karst lakes: "Lagunas de Montebello", Chiapas. *Ecohydrology* 11(8):2029. doi:10.1002/eco.2029.
- Alvarado, J 2015. Evaluación espacial de la contaminación potencial puntual y difusa en la cuenca del Río Grande de Comitán, Chiapas. Tesis para obtener el título de Biólogo: Universidad Nacional Autónoma de México, FES Zaragoza, UNAM, CDMX. 75pp.
- Alvarado J, 2017. Evaluación del transporte de sedimentos y la calidad de agua, utilizando SWAT, en el Río Grande de Comitán, Chiapas. Tesis para obtener el grado de Maestra en Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, UNAM. CDMX. 54pp.
- Anadón P, 1992. El registro sedimentario en el dominio Catalán-Valencia. *Historia Natural de los países catalanes 2*. Enciclopedia Catalana, S. A. Barcelona, España: 297-359.
- Arita HT, Ceballos G, 1997. The mammals of Mexico: distribution and conservation status. *Revista Mexicana de Mastozoología* 2:33-71.

- Bazzanti M, Seminara M, Baldon S, 1998. Assessing hypolimnetic stress in a monomictic, eutrophic lake using profundal sediment and macrobenthic characteristics. *Journal of Freshwater Ecology* 13: 405-412.
- Caballero M, 2003. Paleolimnología: cómo descifrar la historia de los lagos y su entorno a partir del estudio de los sedimentos. *Paleontología Mexicana* 3(1):22-28.
- Comisión Federal de Electricidad (CFE). 2012. Estudio para conocer la calidad del agua de las lagunas de Montebello, Chiapas, México. Tomo I, Hidrometeorología, Reporte Técnico. 264pp.
- Comisión Nacional de Áreas Protegidas (CONANP-RAMSAR). 2003. Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar. Tomado de: http://ramsar.conanp.gob.mx/docs/sitios/FIR_RAMRAR/Chiapas/PN%20Lagunas%20de%20Montebello/Parque%20Nacional%20Lagunas%20de%20Montebello.pdf.
- Comisión Nacional de Áreas Protegidas-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (CONANP-SEMARNAT). 2007. Programa de Conservación y Manejo del Parque Nacional Lagunas de Montebello, México. Editorial EDM. CDMX, México. 200pp.
- Eugster HP, Kelts K, 1983. Lacustrine chemical sediments. En: Goudie AS, Pye K (Eds.) *Chemical Sediments and Geomorphology*. Academic Press, Londres:321-368.
- Flores-Villela, O. 1993. Herpetofauna of Mexico: distribution and endemism. En: *Biological diversity of Mexico: origins and distributions*, Ramamoorthy BR, Lot A, Fa J (eds.). Oxford University Press, Nueva York: 253-280.
- Folk R, Ward W, 1957. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology* 27: 3-27.
- Fregenal MA, Meléndez N, 2010. Sedimentología del proceso físico a la cuenca sedimentaria. Capítulo IX. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, España. 1290pp.

- García E, 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Serie Libros Núm 6. Instituto de Geografía, UNAM, México. 98pp.
- González M, Villanueva R, Prol RM, Mendiola F, 2012. Caracterización de sedimentos del Lago de Chapala, Jalisco, México. XII Congreso Nacional de Geoquímica: 64-69.
- Guadarrama S, 2017. Ecología del bentos de seis lagos del Parque Nacional “Lagunas de Montebello”, Chiapas, México. Tesis para obtener el grado de Bióloga. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, UNAM. CDMX. 46pp.
- Horváth A, 2007. Proceso de consulta del Programa de Conservación y Manejo para el Parque Nacional Lagunas de Montebello. Memoria de la reunión de revisión y análisis de los Programas de Conservación y Manejo para los Parques Nacionales de Chiapas. 195pp.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 1988. Cartas de uso del suelo y vegetación. Las Margaritas. 1:250,000. (E15-12D15-3).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2000. Conjuntos de Datos Vectoriales Edafológicos. 1:250,000. Las Margaritas. 1: 250 000. (E15-12, D15-3).
- Juárez E, 2014. Análisis hidrogeoquímico de la cuenca del Río Grande Comitán. Tesis para obtener el grado de Ingeniera Geóloga. Universidad Nacional Autónoma de México. División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, UNAM, CDMX.107pp.
- Kaiser HF, 1974. An index of factorial simplicity. *Psychometrika* 39(1): 31–36.
- Lara J, Arreola J, Calderón L, Camacho V, De la Lanza G, Escofet A, Espejel M, Guzmán M, Ladah L, López M, Alf M, Moreno P, Reyes H, Ríos E, Zertuche J, 2008. Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales. En: *Capital Natural de México. Conocimiento actual de la biodiversidad 1*. CONABIO:109-134.
- Marensi S, 2019. Fundamentos de sedimentología y estratigrafía: Guía de trabajos prácticos. Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Buenos Aires, Argentina. 96pp.

- Meyers P, Ishiwatari R, 1993. Lacustrine organic geochemistry an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments. En: Pisanty I, Caso M, 2006. Especies, espacios y riesgos: monitoreo para la conservación de la biodiversidad. Instituto Nacional de Ecología. 239 pp.
- Mora L, García LA, Ramos YR, Bonifaz R, Escolero O, 2017. Description of chemical changes in a large karstic system: Montebello, México. *Procedia Earth and Planetary Science* 17: 829 - 832.
- Navarro AG, Benítez H, 1993. Patrones de riqueza y endemismo de las aves. *Ciencias*, No. Esp. 7: 45-54.
- Navarro-Mora SC, 2014. Evaluación de la presencia de sulfuros en el agua de la laguna Chajchaj del sistema lagunar lagos de Montebello. Tesis para obtener el título de Licenciado en Ciencias de la Tierra. Instituto de Ciencias Básicas y Aplicadas, UNICACH, Chiapas, México. 89pp.
- Pérez L, Alfaro G, Palmieri G, Dix M, Maldonado M, Islebe G, Scharf B, Schwalb A, 2008. Paleoclima y paleoecología de las tierras bajas del norte de los neotrópicos: investigación limnológica y extracción de sedimentos del lago Petén Itzá, Guatemala. *Revista de la Universidad del Valle de Guatemala* 18: 65-83.
- Pérez L, Bugja R, Lorenschat J, Brenner M, Curtis J, Hoelzmann P, Islebe G, Scharf B, Schwalb A, 2010. Aquatic ecosystems of the Yucatán Peninsula (México), Belize and Guatemala. *Hydrobiologia* 661: 407-433.
- Pisanty I, Caso M, 2006. Especies, espacios y riesgos: monitoreo para la conservación de la biodiversidad. Instituto Nacional de Ecología. 239pp.
- Ramos-Higuera E, Alcocer J, Ortega-Mayagoitia E, Camacho A, 2008. Nitrógeno: elemento limitante para el crecimiento fitoplanctónico en un lago oligotrófico tropical. *Hidrobiológica* 18: 105-113.
- Roldán G, Ramírez J, 2008. Fundamentos de limnología neotropical. Universidad de Antioquía. Medellín, Colombia: 49-56.

- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2016. Reserva de la Biósfera Lagunas de Montebello, Chiapas, México. Tomado de: https://www.gob.mx/semarnat/articulos/Reserva_de_la_Biosfera_Lagunas_de_Montebello.
- Shepard FP, 1954. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. *J. Sedimen. Petrol.*, 24(3): 151-158.
- Vázquez, M. y E. Méndez. 1994. Aspectos generales de la región: Lagos de Montebello. Reporte del trabajo para el curso de conservación de naturaleza y recursos naturales, Maestría en Ciencias: Recursos Naturales y Desarrollo-Rural, ECOSUR Chiapas. San Cristóbal de las Casas, Chiapas. Maestría en Ciencias, México. 109pp.
- Vera-Franco MN, Hernández-Victoria P, Alcocer J, Ardiles-Gloria V, Oseguera L, 2015. Concentración y distribución vertical de la clorofila-a fitoplanctónica en los lagos de Montebello, Chiapas. En: Alcocer, J., M. Merino-Ibarra, E. Escobar-Briones. (Editores). 2015. Tendencias de investigación en Limnología tropical: Perspectivas universitarias en Latinoamérica. Asociación Mexicana de Limnología, A.C., Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, y Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. México. 107-114.
- Vera-Franco MN, 2017. Concentración y distribución vertical de la biomasa fitoplanctónica en nueve lagos oligotróficos tropicales. Tesis para obtener el grado de Bióloga. Universidad Nacional, Autónoma de México, Facultad de Ciencias, CDMX. 60pp.
- Wentworth CK, 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The Journal of Geology.*, Vol 30(5): 377-392.
- Williams MAJ, Dunkerley D L, de Deckker P, Kershaw AP, Stokes TJ, 1993. *Quaternary Environments*. Edward Arnold. Gran Bretaña. 330pp.