



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA**

**DETERMINACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE SÍLICE PARTICULADO
BIOGÉNICO Y LITOGÉNICO EN AGUAS EPICONTINENTALES: APLICACIÓN AL CASO
DE ALCHICHICA, MÉXICO, UN LAGO OLIGOTRÓFICO TROPICAL**

T E S I S

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS**

PRESENTA:

ING. MARÍA GUADALUPE PÉREZ RAMÍREZ

TUTOR PRINCIPAL:

DR. MARTÍN MERINO IBARRA – ICML, UNAM.

COMITÉ TUTOR:

DR. JAVIER ALCOCER DURAND – FES IZTACALA, UNAM.

DR. MIROSLAV MACEK – FES IZTACALA, UNAM.

DRA. LILIANA SALDÍVAR Y OSORIO – FAC. QUIMICA, UNAM.

DRA. GLORIA VILA CLARA FATJÓ – FES IZTACALA, UNAM.

MÉXICO, D. F., NOVIEMBRE 2015



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.

AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis el Dr. Martín Merino Ibarra por su esfuerzo y dedicación, por brindarme la oportunidad de aprender y trabajar a su lado, permitirme ser parte de su equipo y por el apoyo durante la realización de este trabajo.

Mi más sincero agradecimiento a mi jurado de tutores por su paciencia y ayuda durante todo este proceso, en especial al Dr. Javier Alcocer Durand, con quien inició este sueño, por confiar en mí, impulsándome en todo momento y quien siempre me ha demostrado su apoyo; a la Dra. Gloria Vilaclara Fatjó, por su infinita ayuda, entusiasmo y sus siempre sabios consejos; al Dr. Miroslav Macek, por su sincero e incondicional ánimo, buen humor y comentarios enriquecedores para mi formación; a la Dra. Liliana Saldívar y Osorio, por sus palabras de aliento y disposición en todo momento.

Al Laboratorio de Biogeoquímica Acuática y Físicoquímica Marina del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, por las facilidades otorgadas durante el análisis de muestras. Al Hidrobiólogo Sergio Castillo, por compartir conmigo su experiencia y tiempo en la realización de análisis químicos; a la Dra. Vilma Ardiles, por su amistad, motivación y apoyo absoluto; a la Dra. Patricia Valdespino, por sus enriquecedoras pláticas; al M. en C. Vladislav Carnero; al Dr. Jorge Ramírez y a la M. en C. Luz María López, por su compañerismo; al Dr. Luis Oseguera, por su apoyo en campo; al Ing. Mauricio Arteaga; a la M. en C. Rosalina Castillo; al M. en C. Gerardo Quintanilla y al Laboratorista Emmanuel Linares por hacer de mi trabajo en el laboratorio una grata experiencia.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, al Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología y al CONACYT por darme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado.

A los proyectos **CONACYT-41667** “Limnoecología tropical: Interacciones cuenca de drenaje-lago. 2003-2008” y **DGAPA-IN210806-3, UNAM** “Relevancia del seston en la dinámica biogeoquímica de Alchichica, un lago tropical profundo. 2006-2008”, por el apoyo financiero otorgado para la realización de esta investigación.

DEDICATORIA

A mis padres, Andrés y Guadalupe, por la paciencia, comprensión y por ser parte fundamental de mi vida, por estar presentes e impulsarme en todo momento para salir adelante y dejar atrás cualquier adversidad, por siempre creer en mí y en que podré cumplir mis metas, por motivarme y darme la libertad de ejercer mis decisiones, por ser mi apoyo en mis planes presentes y futuros.

A mis hermanos Verónica, Martha y Andrés que siempre me han acompañado y apoyado durante mi realización profesional y me han dado su mano en los momentos difíciles. A quienes espero poder regresarles con creces todo lo que me han dado.

A mi sobrino Armando, por permitirme ser parte importante de su vida y crecer junto a él, por hacerme parte de sus logros y por alegrar cada día que pasamos juntos.

A Luis, por ser mi apoyo, compartir la vida y los sueños, por estar a mi lado en este largo camino y fomentarme a vencer nuevos retos, por su paciencia, cariño y respeto.

A mis amigos, por siempre alentarme y sentirse orgullosos de mí.

RESUMEN

El análisis de sílice biogénico particulado (SiBP) y de sílice litogénico particulado (SiLP) suspendidos se ha enfocado principalmente a las aguas costeras, utilizando para ello la técnica de doble digestión alcalina de Ragueneau *et al.* (2005). En este estudio se analizaron muestras del lago cráter Alchichica, el cual presenta un fuerte florecimiento de diatomeas de gran tamaño ($>50 \mu\text{m}$) durante su periodo de circulación, lo cual podría incrementar el SiBP en el tirante de agua. Por otro lado, Alchichica se encuentra en una zona semiárida y alta erosión eólica, lo cual favorece la entrada de material particulado alóctono de origen litogénico. Con base en lo anterior, se evaluaron las concentraciones y distribución de SiBP y SiLP en el Lago Alchichica durante condiciones limnológicas contrastantes del año 2008, utilizando para ello la técnica de Ragueneau *et al.* (2005). Los resultados demostraron la aplicabilidad de esta técnica en aguas epicontinentales, en particular en el lago Alchichica, obteniéndose resultados coherentes con la dinámica del lago y los patrones de distribución vertical y temporal asociados. Las concentraciones de SiBP promediaron $41.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ durante el periodo estudiado, aproximadamente el doble de la media registrada para el SiLP, que fue de $21.1 \mu\text{mol L}^{-1}$. El SiBP y la clorofila-a mostraron tendencias verticales similares, específicamente durante el florecimiento invernal y en el máximo profundo de clorofila durante la estratificación. La concentración de sílice biogénico de Alchichica presentó gran variabilidad en el periodo de estudio, oscilando de $3.7\text{--}123 \mu\text{mol L}^{-1}$ y con una desviación estándar global de $28.5 \mu\text{mol L}^{-1}$. En contraste, la concentración del SiLP presentó una variabilidad baja, con un rango de $7.9\text{--}42 \mu\text{mol L}^{-1}$ y una desviación estándar global de solamente $9.0 \mu\text{mol L}^{-1}$. También se evaluaron los flujos verticales de SiBP y SiLP mediante trampas de sedimentación. El flujo de SiBP fue el doble (media $0.84 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), que el de SiLP (media $0.42 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$). La variabilidad del flujo de SiBP también fue mayor que la de SiLP, debido particularmente al contraste entre circulación y estratificación. El máximo flujo vertical de SiBP (media $1.50 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) se presentó en la circulación, respaldando la importancia del flujo de SiBP a los sedimentos del lago Alchichica debido al florecimiento invernal de las diatomeas.

ABSTRACT

The analysis of suspended particulate biogenic silica (PBSi) and particulate lithogenic silica (PLSi) have mainly focused on coastal waters, using the technique of double alkaline digestion of Ragueneau et al. (2005). In this study we analyzed water samples from crater lake Alchichica, which exhibits a strong diatom bloom large ($> 50 \mu\text{m}$) during its circulation period, which could increase the PBSi in water column. On the other hand, Alchichica is located in a semi-arid zone and high wind erosion, which favors the input of allochthonous lithogenic particulate material. The aim of this study was to assess the concentrations and distribution of PBSi and PLSi on Alchichica Lake during contrasting limnological conditions in 2008, using the Ragueneau et al. (2005) technique of double alkaline digestion. The results demonstrated the applicability of this technique in epicontinental waters, particularly in the lake Alchichica; we obtained results consistent with the dynamics of the lake and the associated vertical distribution and temporal patterns. PBSi concentrations averaged $41.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ during the period studied, approximately doubling the average obtained for the PLSi, which was $21.1 \mu\text{mol L}^{-1}$. PBSi and chlorophyll-a showed similar vertical trends, specifically during the winter bloom and in the deep chlorophyll maximum during stratification. The biogenic silica concentration in Alchichica showed a great variability during the studied period, ranging $3.7\text{--}123 \mu\text{mol L}^{-1}$ with a standard deviation of $28.5 \mu\text{mol L}^{-1}$. In contrast, the concentration of lithogenic silica presented lower variability, ranging $7.9\text{--}42 \mu\text{mol L}^{-1}$ with a standard deviation of only $9.0 \mu\text{mol L}^{-1}$. Vertical PBSi and PLSi fluxes were also evaluated by sedimentation traps. PBSi flux was twice as big (average $0.84 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) than PLSi flux (average $0.42 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). The variability of PBSi flux was also greater than that of PLSi, due particularly to the contrasting values of PBSi between circulation and stratification. The maximum vertical PBSi flux (average $1.50 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) was observed during circulation, supporting the importance PBSi flux to the lake sediments Alchichica due to winter diatoms bloom.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 SOLUBILIDAD DEL SÍLICE.....	13
1.1.1 <i>Sílice Biogénico</i>	14
1.1.2 <i>Sílice Litogénico</i>	15
2. JUSTIFICACIÓN	16
3. OBJETIVOS	17
3.1 OBJETIVO GENERAL	17
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
4. HIPÓTESIS	18
5. ÁREA DE ESTUDIO	19
6. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	22
6.1 TRABAJO DE LABORATORIO	25
6.1.1 <i>Determinación de Sílice Soluble Reactivo</i>	25
6.1.2 <i>Determinación de Sílice Particulado Biogénico y Litogénico</i>	26
6.1.3 <i>Análisis Estadísticos</i>	31
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
7.1 PRUEBAS PRELIMINARES.....	32
7.2 PRECISIÓN Y PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN DEL MÉTODO	35
7.3 ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS DE AGUA COLECTADAS EN EL LAGO ALCHICHICA: APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE DOBLE DIGESTIÓN ALCALINA.....	36
7.3.1 <i>Análisis Exploratorio de Datos</i>	36
7.3.2 <i>Contenido de Sílice Biogénico y Litogénico en el Material Suspendido de la Columna de Agua del Lago Alchichica</i>	40
7.3.3 <i>Corrección de la Interferencia Causada por el Material Litogénico</i>	44
7.4 DISTRIBUCIÓN VERTICAL Y TEMPORAL DE SÍLICE BIOGÉNICO Y LITOGÉNICO EN ALCHICHICA.....	47
7.4.1 <i>Descriptores Limnológicos</i>	47
7.4.2 <i>Distribución de Sílice Biogénico Particulado (SiBP)</i>	51
7.4.3 <i>Distribución de Sílice Litogénico Particulado (SiLP)</i>	58
7.5 FLUJOS VERTICALES ESTIMADOS EN TRAMPAS DE SEDIMENTOS	59
7.5.1 <i>Flujos de Sílice Biogénico Particulado</i>	59
7.5.2 <i>Flujos de Sílice Litogénico Particulado</i>	61
8. CONCLUSIONES	64
9. LITERATURA CITADA.....	67

FIGURAS

Figura 1. Área de Estudio; Alchichica, Puebla/Veracruz, México.....	19
Figura 2. Dimensiones del Lago Cráter Alchichica.....	20
Figura 3. Hidrodinámica, Lago Cráter Alchichica.....	21
Figura 4. Distribución de los puntos de muestreo (+) en el Lago Alchichica durante el periodo de a) circulación y b) estratificación.....	23
Figura 5. Diagrama de las trampas de sedimento colocadas en el Lago Alchichica durante la a) circulación y b) estratificación.....	24
Figura 6. Meteorización hipotética de sílice particulado mediante el proceso de doble digestión alcalina.	29
Figura 7. Esquema del método para la determinación de SiBP y SiLP	30
Figura 8. Diagrama de caja para las concentraciones de SiLP del mes de febrero, septiembre y noviembre del 2008. La línea central indica la mediana, la caja incluye al 50% de los datos y los bigotes el 95% de ellos.	39
Figura 9. Concentraciones de sílice biogénico (SiB) y sílice litogénico (SiL) en el mes de febrero (feb), septiembre (sep) y noviembre (nov) del año 2008.	41
Figura 10. Diagrama de caja para sílice biogénico (SiB) y sílice litogénico (SiL)	42
Figura 11. Frecuencia de las concentraciones de sílice biogénico (SiB) y sílice litogénico (SiL) durante los meses de febrero, septiembre y noviembre del año 2008.	43
Figura 12. Porcentaje de corrección de sílice biogénico particulado para los meses de a) febrero, b) septiembre y c) noviembre.	46
Figura 13. Perfil de Temperatura y oxígeno disuelto (O.D.) del año 2008 durante a) circulación, b) estratificación bien establecida y c) estratificación tardía.....	49
Figura 14. Perfiles de fluorescencia natural de clorofila a (Cl-a) y PAR durante la a) circulación, b) estratificación bien establecida y c) estratificación tardía durante el año 2008.	50
Figura 15. Distribución de sílice biogénico particulado (SiBP) en $\mu\text{mol L}^{-1}$ a lo largo de la columna de agua del lago Alchichica durante el año 2008.	51
Figura 16. Perfiles de clorofila (Cl-a), sílice biogénico particulado (SiBP) y sílice soluble reactivo (SiSR) del lago Alchichica durante el periodo de circulación del año 2008.....	53
Figura 17. Correlación de SiBP y Cl-a durante la circulación del año 2008.	54
Figura 18. . Perfiles de clorofila (Cl-a), sílice biogénico particulado (SiBP) y sílice soluble reactivo (SiSR) del lago Alchichica durante el periodo de estratificación bien establecida del año 2008.	55
Figura 19. Perfiles de clorofila (Cl-a), sílice biogénico particulado (SiBP) y sílice soluble reactivo (SiSR) del lago Alchichica durante el periodo de estratificación tardía del año 2008.....	57
Figura 20. Distribución de sílice litogénico particulado (SiLP) en $\mu\text{mol L}^{-1}$ a lo largo de la columna de agua del lago Alchichica durante el año 2008.....	58

Figura 21. Flujos ($\text{g m}^{-2} \text{día}^{-1}$) de sílice biogénico particulado (SiBP) colectado en las trampas de sedimentos de superficie, columna y fondo del lago Alchichica durante el año 2008.....	61
Figura 22. Flujos de sílice litogénico particulado (SiLP) en $\text{g m}^{-2} \text{día}^{-1}$, colectado en las trampas de sedimentos de superficie, columna y fondo del lago Alchichica.	63

ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación para determinar la concentración de sílice biogénico particulado	28
Ecuación 2. Ecuación para la determinación del sílice litogénico particulado.....	28
Ecuación 3. Cálculo de los flujos de sedimentación.....	31

1. Introducción

A lo largo de las últimas décadas el estudio de sílice en ambientes acuáticos ha sido enfocado principalmente a su determinación como elemento micronutriente esencial para el crecimiento de organismos acuáticos importantes como, por ejemplo, las diatomeas (Wetzel, 1981; Brönmark y Hansson, 2005), consideradas como uno de los pilares de las redes tróficas en los ecosistemas acuáticos. El desarrollo de las diatomeas está influido por la disponibilidad de nutrientes en general, pero principalmente por la disponibilidad de sílice disuelto, elemento que utilizan para formar sus paredes celulares silíceas (Libes, 2009; Oliva *et al.*, 2008). Las diatomeas asimilan grandes cantidades de sílice para la síntesis de sus frústulos, llegando a representar hasta un 60% del peso seco en algunas especies (Sicko-Goad *et al.*, 1984); por lo anterior, presentan una importante influencia sobre la variación de la concentración de sílice en las aguas epicontinentales (Libes, 2009).

En general se ha observado que la disponibilidad del sílice en las aguas epicontinentales es moderada (Wetzel, 1981). Por otra parte, Margalef (1983) señala que esta disponibilidad depende de la litología de la cuenca, destacando que para lagos ubicados en zonas volcánicas generalmente se han encontrado altas concentraciones de sílice debido a la composición química de la lava local; contrario a esto, Wetzel (1981) refiere que muchos de los lagos asociados a actividad volcánica poseen bajas concentraciones de nutrientes, particularmente de sílice, debido a la estructura cristalina de los basaltos, la cual dificulta su meteorización. Tales condiciones de bajas concentraciones de nutrientes se observan en el lago cráter Alchichica, que se caracteriza por tener florecimientos invernales importantes de fitoplancton y muy bajas concentraciones de sílice disuelto o sílice soluble reactivo (SiSR) (en general $< 17 \mu\text{mol SiSR}$), en comparación con otros lagos ubicados en zonas volcánicas (Armienta *et al.*, 2008). En Alchichica se han observado 13 especies de diatomeas, de las cuales la de presencia más consistente durante el año es la especie endémica *Cyclotella alchichicana* ($\approx 55 \mu\text{m}$) (Ardiles *et al.*, 2012), diatomea de gran talla que aumenta de manera significativa los requerimientos de sílice en el lago.

Debido a la dominancia de fitoplancton de talla grande, la sedimentación de los nutrientes absorbidos por las diatomeas se facilita, llevándolos por debajo de la zona fótica y la termoclina hacia el hipolimnion, acumulándose en los sedimentos un gran porcentaje de frústulos de diatomeas y perdiéndose permanentemente del sistema (Wetzel, 1981), limitando de manera considerable la cantidad de sílice disponible para el siguiente florecimiento de diatomeas. Sin embargo, es importante señalar que para el caso de Alchichica, los florecimientos anuales de diatomeas se presentan año con año variando en intensidad y duración (Adame *et al.*, 2008), presentando en ocasiones flujos anuales de 15×10^9 células m^{-2} año⁻¹, que al ser comparados con los flujos de otros ecosistemas acuáticos de características similares a las de Alchichica, son ampliamente más altos (Ardiles *et al.*, 2012).

Según Margalef (1983) más del 90% del sílice disuelto en los lagos es producto del reciclado de las valvas de diatomeas y de otros organismos, como crisofíceas y silicoflagelados; por tal motivo la medición del sílice contenido en los frústulos de las diatomeas es de suma importancia. Pese a lo anterior, el desarrollo de técnicas o estudios para la determinación de sílice biogénico en ambientes epicontinentales es sumamente escaso, existiendo un mayor desarrollo sólo para ambientes marinos.

La determinación del sílice biogénico particulado en aguas costeras comenzó aproximadamente en el año de 1960, debido al interés que despertaron las diatomeas por el papel que juegan en la transferencia de carbono hacia los niveles tróficos superiores y/o su exportación hacia los sedimentos. Comenzó así la implementación de métodos para la estimación del contenido de sílice biogénico (ópalo) en depósitos marinos, sin ningún tipo de distinción entre materiales de origen mineral y biológicos. La dificultad de la medición de sílice biogénico particulado (SiBP) no sólo reside en las dificultades inherentes a su extracción, la cual debe ser completa, sino también en la interferencia provocada por la existencia de sílice litogénico particulado (SiLP) que puede llegar a representar hasta un 90% o más del sílice particulado total en la columna de agua (Ragueneau y Tréguer, 1994; Ragueneau *et al.*, 1994).

Ragueneau *et al.* (2005) utilizaron el método de extracción alcalina descrita anteriormente por Brzezinski y Nelson (1989) para hacer la distinción entre SiBP y SiLP en el material particulado suspendido de la columna de agua, proponiendo una modificación en el método para lograr corregir la interferencia causada por los silicatos, utilizando para esto la relación estequiométrica de Si:Al de los minerales que conforman la litología de la cuenca hidrográfica.

El utilizar la relación Si:Al al hacer la distinción entre sílice biogénico y sílice litogénico se debe a que la mayoría de los minerales de la litosfera terrestre contienen aluminio en su composición química, como los feldespatos (Iriondo, 2007), los cuales están clasificados desde el punto de vista estructural como aluminosilicatos constituidos por redes tridimensionales de tetraedros de SiO_4 , en los cuales parte del sílice se encuentra sustituido por aluminio; las proporciones Si:Al son diferentes en cada mineral, la cual puede llegar a ser 1:1 en el caso de los feldespatos cálcicos ó 1:3 para los feldespatos potásicos y sódicos (Besoain, 1985).

El sílice es el principal constituyente de cientos de importantes formaciones de rocas minerales y se encuentra distribuido a lo largo de toda la corteza terrestre (Canfield *et al.*, 2005), convirtiéndose así en la principal fuente de sílice en aguas naturales. Por lo anterior, el aporte superficial de sílice en los sistemas acuáticos puede darse de dos formas, mediante la descomposición de aluminosilicatos minerales que se encuentran en la cuenca de drenaje por la que fluye el agua de la escorrentía (Hutchinson, 1975) o como polvo mineral, el cual se levanta directamente de los suelos por la acción de los vientos, siendo la corteza terrestre fuente de partículas producidas como consecuencia de la erosión de las rocas. Como es de esperarse, la mayor carga eólica de minerales se encuentra frecuentemente en las regiones áridas y semiáridas del planeta (Libes, 2009).

Alchichica se encuentra en una zona con una marcada escasez de agua superficial debido a las condiciones climáticas semiáridas de la Cuenca Oriental, región central de México (Alcocer *et al.*, 2004), por lo tanto es un lago sin ningún tipo de afluentes ni efluentes superficiales (Kazmierczak *et al.*, 2011). Su principal aporte de agua proviene del manto

freático y, en una menor cantidad pero de forma directa, de la precipitación pluvial. Es natural pensar que en zonas semiáridas la fuente alóctona es la principal entrada de la deposición de partículas en el lago, provocado por las amplias superficies secas expuestas a los vientos que favorecen en frecuencia y gravedad a los torbellinos; la zona central de la Cuenca Oriental presenta una alta erosión eólica, lo cual podría favorecer la entrada de partículas al lago (Oseguera *et al.*, 2010).

Los estudios realizados por Oseguera *et al.* (2010) sobre los flujos de sílice en la columna de agua en Alchichica y la importancia de la entrada de material eólico al lago mencionan que anualmente, en promedio, el 92% del material alóctono capturado en trampas aéreas, consiste en minerales detríticos. La composición elemental (en proporción molar) de estas partículas de aluminosilicatos mostró un predominio de sílice (32 %), seguido de aluminio (8 %). Asimismo, las mismas trampas registraron una mínima proporción de partículas de sílice amorfo en forma de obsidiana (≈ 3 %). Las partículas capturadas en trampas de agua en su mayoría son de origen biogénico, compuestas principalmente por células de diatomeas de gran tamaño (21 %) y sus frústulos vacíos (54 %). En cuanto a material litogénico la cantidad fue mínima (3 %) destacando que su composición química era similar a la del material litogénico de las trampas aéreas, indicando su origen alóctono.

La alta erosión de la cuenca Oriental también se ve reflejada en un estudio realizado por Alcocer y Filonov (2007), en donde sus resultados arrojaron que en un evento esporádico de fuertes lluvias en Alchichica (Octubre de 1999), las concentraciones y distribución de nutrientes fueron similares a las descritas por Oliva *et al.* (2001), a pesar de la alta escorrentía en donde se esperaban nutrientes provenientes de la tierra agrícola. Sin embargo, la excepción fue la concentración de SiSR presentando un aumento en su concentración contrario a los demás nutrimentos.

1.1 Solubilidad del Sílice

Después del oxígeno, el sílice se considera como el elemento más abundante en la corteza terrestre; sin embargo, la mayor parte no está disponible para los organismos, por encontrarse aprisionado en formas minerales relativamente insolubles, en las rocas (silicatos, feldespatos, cuarzo) (Wetzel, 1981; Canfield *et al.*, 2005). La meteorización de los silicatos consiste predominantemente en una hidrólisis no enzimática, no obstante se sabe que juegan un papel en el desgaste de las rocas y minerales de las zonas tropicales áridas, en ausencia de sustratos orgánicos (Savostin, 1972). En ecosistemas acuáticos es común encontrar sílice en forma disuelta, coloidal y particulada, considerando como sílice disuelto y sílice coloidal aquel que pasa a través de un filtro de 0.45 μm , y sílice particulado como aquel que se queda retenido en el filtro (Krausse *et al.*, 1983). La concentración de sílice disuelto es fuertemente dependiente del pH, además de ser controlado por diferentes procesos, tales como la disolución/precipitación, adsorción/desorción y la eliminación biológica (Sjöberg, 1996).

El proceso de disolución de los silicatos y sílice en soluciones acuosas, se debe principalmente a la hidrólisis, resultando en la formación de ácido silícico (H_4SiO_4) (Sjöberg, 1996; Icenhower y Dove, 2000; Candfield *et al.*, 2005). Las concentraciones de ácido silícico dependen principalmente de los valores de pH; a pH relativamente bajo, el ácido silícico que se encuentra en forma no disociada, es soluble en agua, convirtiéndose así en la especie química más abundante. Conforme el pH aumenta, aproximadamente a partir de pH 9 (Margalef, 1983) se van presentando progresivamente mayores proporciones del ión silicio en sus diferentes especies, H_3SiO_4^- , $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ y SiO_3^{2-} respectivamente, siendo la concentración de este último despreciable, excepto bajo condiciones de basicidad extrema (Margalef, 1974; Hutchinson, 1975). El sílice es relativamente inmóvil a valores de pH inferiores a 3, formando agregados y aumentando su movilidad lentamente desde pH 4 hasta pH 9 (Wetzel, 1981). Debido a que el Lago Alchichica presenta valores de $\text{pH} \approx 9$, el ion que probablemente domine en el lago es el H_3SiO_4^- .

1.1.1 Sílice Biogénico

En la mayoría de los hábitats acuáticos donde viven las diatomeas, la forma principal de sílice en disolución es Si(OH)_4 , el cual es incorporado del medio por estos organismos convirtiéndolo en ópalo biogénico o sílice biogénico particulado. La tasa de disolución de sílice en la columna de agua disminuye conforme su concentración se aproxima a la saturación del mismo, debido a que la concentración aumenta generalmente con la profundidad, la mayor disolución ocurre cerca de la superficie y disminuye hacia el fondo del lago y en los sedimentos. La disolución del SiB en agua es un proceso fisicoquímico sencillo, controlado por variables clave, tales como la concentración de sílice disuelto, temperatura, pH y el área superficial de los frústulos (Canfield *et al.*, 2005).

Cuando las diatomeas mueren, el sílice contenido en sus frústulos se disuelve y regresa a la columna de agua, contrario a lo que sucede con las células vivas, en donde el frústulo se encuentra protegido por una capa de materia orgánica, constituida principalmente por aminoácidos, algunos análogos a los encontrados en el colágeno y polisacáridos sulfatados los cuales contienen fucosa, manosa y galactosa, evitando que el sílice contenido en los frústulos de las células vivas se disuelva con la misma intensidad que el de las células muertas (Oliva *et al.*, 2008). Aun así, se ha demostrado que la disolución del sílice biogénico es mucho más rápida que la de las formas minerales cristalinas (Marín, 2003).

Algunas especies de diatomeas, debido a su gran tamaño (*e.g.*, *Cyclotella alchichicana*), sedimentan hacia aguas profundas, por debajo de la termoclina, al no ser consumidas en su totalidad (Alcocer *et al.*, 2008). Los frústulos que llegan a la zona hipolimnética y quedan enterrados en los sedimentos pueden quedar o no preservados, dependiendo de las condiciones químicas bajo las que se encuentren; debido a que el pH ácido tiende a preservarlos, mientras que el pH básico tiende a disolver las valvas silíceas. Otros factores que permiten la conservación o disolución de los frústulos durante su sedimentación o ya en los sedimentos son su tamaño, el grosor de la pared silícea y la interacción con el resto del material orgánico e inorgánico también sedimentado, principalmente por aquellos que generan cambios en el pH (Oliva *et al.*, 2008).

1.1.2 Sílice Litogénico

Más del 90% de los minerales que conforman las rocas, son silicatos y poseen en su estructura química grandes cantidades de oxígeno y sílice. La unidad estructural fundamental de todos los silicatos cristalinos es un tetraedro que tiene un anión O^{2-} en cada una de sus cuatro esquinas, y un catión Si^{4+} en el centro (Libes, 2009). El $(SiO_4)^{4-}$ es una unidad de empaquetamiento fundamental de los silicatos y las diversas formas en las que este grupo puede enlazarse con otros grupos, compartiendo uno, dos o todos los oxígenos de los vértices del tetraedro, son fundamentales en la clasificación de silicatos (Klein y Hurlbut, 1996). Cuando hay presentes otros iones en la estructura, por lo general comparten oxígenos de los grupos SiO_4^{4-} para dar una configuración octaédrica alrededor del catión (Alexander y Douglas, 1987). Después del sílice y el oxígeno, el elemento más abundante sobre la corteza terrestre es el aluminio y por tal motivo es común encontrarlo substituyendo al Si^{4+} en la estructura tetraédrica del silicato, formando aluminosilicatos (Libes, 2009). En los aluminosilicatos el catión Al^{3+} puede ser rodeado por 4 ó 6 átomos de oxígeno y debido a que dicho catión tiene un diámetro iónico muy similar al del Si^{4+} , puede reemplazarlo en el centro del tetraedro (Alexander y Douglas, 1987).

El mecanismo de la disolución de los silicatos es similar al de la de los óxidos. La protonación superficial de O y sitios con OH^- acelera la disolución a medida que disminuye el pH. En los aluminosilicatos la protonación produce un desprendimiento lento de Al en la estructura, dando paso a la formación posterior de $Si(OH)_4$ (Stumm y James, 1996). Se puede generalizar que la velocidad de disolución está relacionada con la carga superficial impartida por H^+ , por lo tanto la velocidad de disolución se incrementa cuando la carga superficial es positiva, aumentando con la disminución de los valores de pH de la disolución (Walter, 1996).

El sílice litogénico en ecosistemas acuáticos puede encontrarse como partículas de seston mineral (Margalef, 1974), y de entre todos los silicatos, los de más alta solubilidad son los de Na y K que se disuelven tras meteorizarse previamente el mineral de origen (Marín, 2003).

2. Justificación

En el lago Alchichica se han realizado diversos estudios sobre la dinámica fitoplanctónica (Oliva *et al.*, 2001; Adame *et al.*, 2008; Alcocer *et al.*, 2008; Ardiles *et al.*, 2012). Se ha observado que el lago presenta un ciclo bienal posiblemente relacionado con la disponibilidad de sílice, el cual es reflejado en un fuerte florecimiento de diatomeas de gran tamaño ($\sim 55 \mu\text{m}$), a pesar de registrar concentraciones de sílice soluble reactivo (SiSR) $< 17 \mu\text{mol}$ (Ardiles *et al.*, 2012). El incremento en la abundancia de diatomeas aumenta los requerimientos de sílice en el lago, lo que se ha propuesto que conlleva a las bajas concentraciones de este nutriente registradas durante el periodo de estratificación al ser consumido por las diatomeas casi en su totalidad, lo que incrementaría la proporción del sílice particulado en la columna de agua que es de origen biogénico. Sin embargo, Alchichica se encuentra en una zona semiárida y con una alta erosión eólica, lo cual favorece la entrada de material particulado alóctono, entrada potencialmente importante de sílice litogénico.

Hasta el momento la forma en que se ha estudiado el sílice en Alchichica es solamente como sílice disuelto, sin tomar en cuenta el aporte de sílice particulado autóctono ni alóctono. Por todo lo anterior, el lago Alchichica es un lugar ideal para aplicar la técnica de la determinación de sílice biogénico y litogénico particulado y con esto poder entender la dinámica del sílice particulado y disuelto durante los periodos de circulación y de estratificación del lago.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Aplicar la técnica de determinación de sílice particulado -tanto el biogénico como el litogénico- mediante la doble digestión alcalina propuesta por Ragueneau *et al.* (2005), para estudiar la dinámica vertical y temporal de sílice en el lago cráter Alchichica, México.

3.2 Objetivos Específicos

- Aplicar la técnica de doble digestión alcalina, desarrollada para la determinación de sílice biogénico y litogénico particulado en aguas costeras por Ragueneau *et al.* (2005), para la determinación de ambos tipos de sílice particulado en aguas continentales, en particular en el lago cráter Alchichica, México.
- Determinar las concentraciones de sílice biogénico y de sílice litogénico en la columna de agua del lago.
- Comparar la distribución vertical de sílice biogénico y sílice litogénico en Alchichica durante condiciones limnológicas contrastantes (estratificación y circulación), y posteriormente compararlas con los flujos verticales de sílice observados.
- A través de la coherencia de los resultados, evaluar la efectividad de la técnica para la determinación de sílice biogénico particulado en aguas epicontinentales, en particular en el lago cráter Alchichica, México.

4. Hipótesis

1. El método de doble digestión alcalina publicado por Ragueneau *et al.* (2005) para la determinación de sílice biogénico en el material particulado, que incluye una corrección a la interferencia de sílice litogénico y fue diseñado para aguas costeras y estuarinas, puede ser utilizado exitosamente también en aguas epicontinentales, como en el lago cráter Alchichica.
2. El contenido de sílice biogénico particulado en la columna de agua del lago Alchichica es mayor que el de sílice litogénico particulado, debido principalmente a que se han observado dominancias de diatomeas en determinadas épocas y niveles de la columna de agua.
3. La entrada de sílice alóctono particulado en Alchichica es de magnitud reducida, por lo tanto la disponibilidad de sílice disuelto en el lago, es producto principalmente del reciclado de las valvas de las diatomeas.

5. Área de Estudio

El lago cráter Alchichica se localiza en la región central de México ($19^{\circ}24.7' N$, $97^{\circ}24.0' W$) a una altitud de 2,345 m s.n.m. (Figura 1), en la cuenca endorreica Oriental ($4,982 \text{ km}^2$), al extremo SE del Altiplano Mexicano, entre los estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala (Filonov *et al.*, 2006; Alcocer *et al.*, 2000).

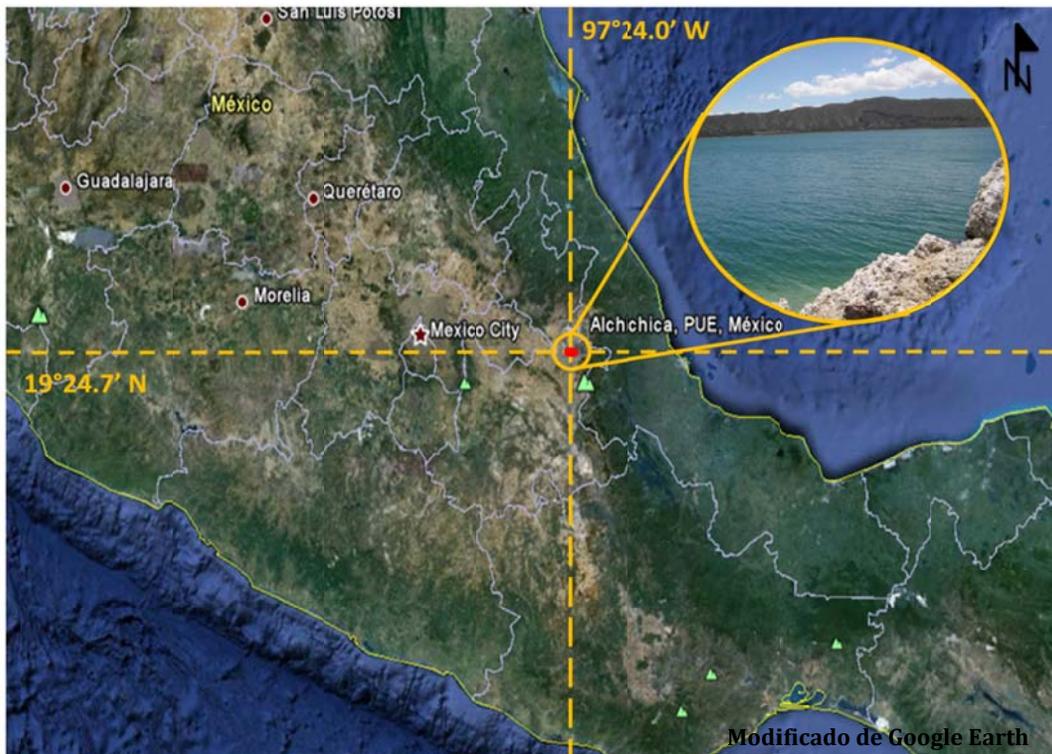


Figura 1. Área de Estudio; Alchichica, Puebla/Veracruz, México.

La forma del lago es circular con un diámetro de 1,733 m, un área de 2.3 km² y un perímetro de 5.1 km (Figura 2). Presenta una reducida zona litoral y un talud muy abrupto. La profundidad máxima de Alchichica es de 62 m, su profundidad promedio es de 40.9 m y alberga un volumen de 94, 214,080 m³ (Filonov *et al.*, 2006). Es un lago hiposalino (8.5g L⁻¹) con iones predominantes de sodio, magnesio, cloruros y bicarbonato (Vilaclara *et al.* 1993).

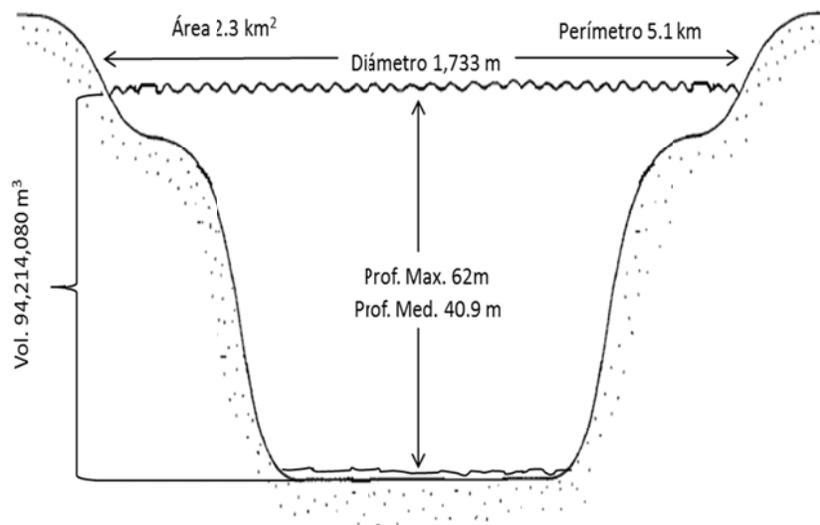


Figura 2. Dimensiones del Lago Cráter Alchichica

Cuenta con una temperatura anual media de 12.9 °C, una tasa de evapotranspiración anual de 1,690 mm y una precipitación anual menor de 500 mm (Adame *et al.*, 2008; Alcocer *et al.*, 2000). Su hidrodinámica lo caracteriza como un lago monomíctico cálido (Figura 3). La mezcla se lleva a cabo de finales de diciembre o principios de enero, a finales de marzo o principios de abril, durante la época fría y seca, permaneciendo estratificado el resto del año (Alcocer *et al.*, 2000; Oliva *et al.*, 2001).

Alchichica presenta concentraciones de Cl-a generalmente bajas, $4 \mu\text{g L}^{-1}$ (Ardiles *et al.*, 2012) que corresponde a condiciones oligotróficas de acuerdo con el criterio de Margalef (1983). Asimismo, las mayores concentraciones Cl-a ($>10 \mu\text{g L}^{-1}$) se presentan en enero, mostrando un ambiente mesotrófico que rápidamente decrece durante la estratificación (Macek *et al.* 2009; Ardiles *et al.*, 2012)

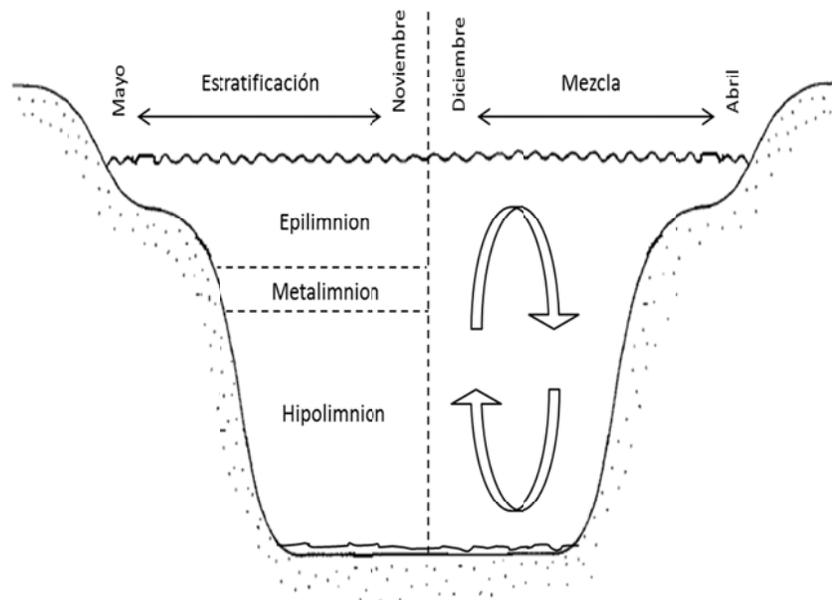


Figura 3. Hidrodinámica, Lago Cráter Alchichica

6. Desarrollo Experimental

Con el fin de probar la efectividad de la técnica en aguas epicontinentales, se colectaron mensualmente diez muestras a diferentes profundidades de la columna de agua, procedentes de la estación de muestreo situada en la parte central y más profunda del lago Alchichica (62 m), utilizando una botella muestreadora de agua marca UWITEC de 5 litros de capacidad.

Durante los muestreos se buscó representar la heterogeneidad vertical de la columna de agua, realizando mediciones a lo largo de la columna de agua para encontrar la ubicación de las principales clinas (termoclina, oxiclina) así como el máximo profundo de clorofila.

La localización de los estratos en el lago se realizó mediante la elaboración de perfiles de temperatura (exactitud ± 0.15 °C) y oxígeno disuelto (exactitud ± 0.2 mg L⁻¹) a un distanciamiento en la vertical de un metro, con ayuda de una sonda multiparamétrica marca Hydrolab, modelo DS4, acoplado a un sistema de almacenamiento de datos marca Hydrolab, modelo SVR4. Por otro lado, la distribución de la clorofila *a* en el perfil vertical se obtuvo cada segundo, con la ayuda de un perfilador de fluorescencia natural marca Biospherical, modelo PNF-300.

En el periodo de estratificación, se colectaron muestras procedentes de las tres capas (epilimnion, metalimnion e hipolimnion). Durante el periodo de circulación vertical, las muestras fueron tomadas a profundidades distribuidas equitativamente a lo largo de la columna de agua (Figura 4).

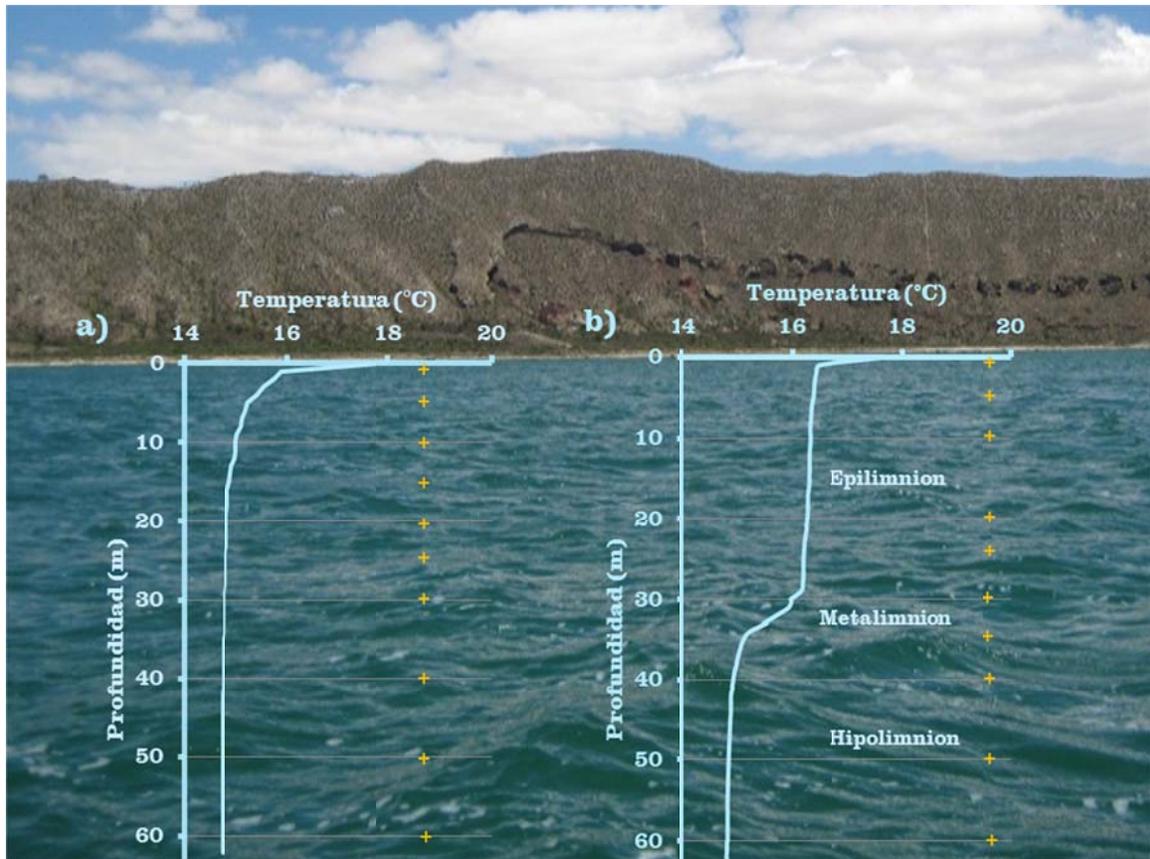


Figura 4. Distribución de los puntos de muestreo (+) en el Lago Alchichica durante el periodo de a) circulación y b) estratificación.

Para la determinación de los flujos de sedimentación de material particulado se emplearon trampas de sedimentos marca KC-Denmark, formadas por 4 cilindros de acrílico con una altura de 45 cm y un diámetro de 7.4 cm, además de una proporción longitud: diámetro de 5.6, estimada para prevenir la resuspensión del material atrapado (Punning *et al.*, 2003).

Las trampas se colocaron en la zona central y más profunda del lago, repartidas en tres distintas profundidades a lo largo de la columna de agua (Figura 5). Durante la estratificación se instalaron en la base del epilimnion, debajo del metalimnion y aproximadamente a tres metros del sedimento para evitar la resuspensión.

Durante la circulación, las profundidades de las dos primeras trampas fueron seleccionadas de manera equitativa (20 m y 40 m) y la de fondo permaneció siempre a la misma profundidad.

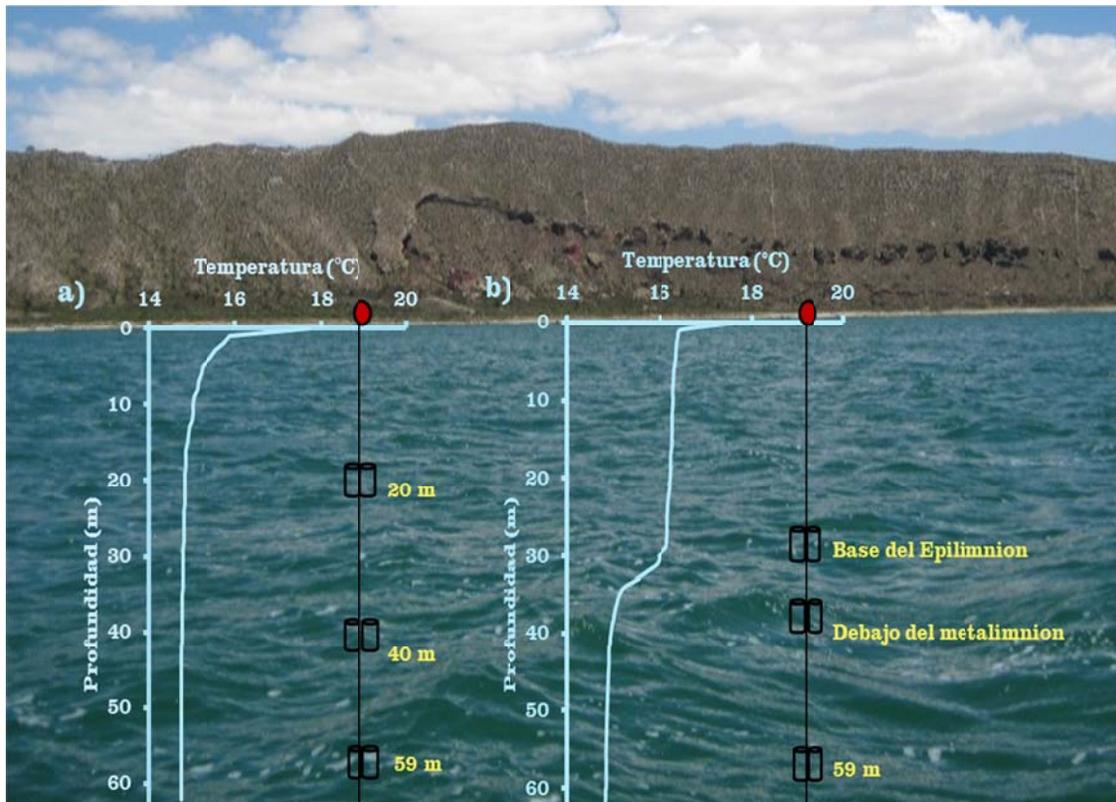


Figura 5. Diagrama de las trampas de sedimento colocadas en el Lago Alchichica durante la a) circulación y b) estratificación.

Las muestras tomadas para la determinación de sílice particulado fueron filtradas inmediatamente después de su recolección, utilizando filtros de policarbonato marca Whatman de 47mm de diámetro, con una apertura de poro de $2\mu\text{m}$. Los filtros se almacenaron en contenedores de plástico y fueron conservados bajo condiciones de congelación hasta el momento de su análisis.

Para la determinación de sílice soluble reactivo, las muestras de agua colectadas fueron filtradas al momento de su obtención, utilizando un filtro de 0.2 μm de apertura y 25mm de diámetro. Posteriormente, se colocaron en frascos de plástico de 30mL y se mantuvieron en oscuridad y a baja temperatura durante su traslado al laboratorio, lo cual se logró utilizando un recipiente plástico con una cama de hielo. En el laboratorio las muestras permanecieron congeladas hasta su análisis.

6.1 Trabajo de Laboratorio

6.1.1 Determinación de Sílice Soluble Reactivo

El análisis de sílice soluble reactivo se realizó en el Laboratorio de Biogeoquímica Acuática del ICML, UNAM, utilizando un autoanalizador de flujo segmentado (AFS) Marca Skalar San plus System y el método estándar para el análisis de sílice reactivo soluble adaptado para el análisis de flujo continuo por Grasshoff *et al.* (1983), así como el circuito analítico sugerido para ello por Kirkwood (1994). Este arreglo analítico tiene una precisión reportada para el método de 0.10 $\mu\text{mol L}^{-1}$, permite manejar un gran número de muestras y tratar cada una de ellas de la misma manera dentro de condiciones de operación controladas.

El AFS es un equipo químico de alta precisión, en el que automáticamente se recoge un volumen de cada muestra y se inyecta sobre la línea de flujo continuo, separándolas entre sí por agua de referencia, o línea base. La introducción de la muestra al equipo es mediante una bomba peristáltica la cual dispone asimismo de un sistema de inyección de aire que proporciona una segmentación precisa y reproducible, para minimizar la mezcla entre los segmentos. La bomba empuja la muestra a través de finas tuberías de plástico hasta la unidad química, en donde el analizador añade secuencialmente a la muestra los reactivos necesarios para que se forme el producto final de la reacción, la cual se lleva a cabo durante su paso por serpentines de mezclados. En el AFS la determinación de sílice se realiza como silicatos, o sílice soluble reactivo; dentro del analizador los silicatos reaccionan con una disolución de molibdato de amonio y mediante una reacción química se forman dos isómeros, el isómero α y el isómero β , del ácido silicomolíbico. De estos dos isómeros el α es el más estable, pero su formación es mucho más lenta que la del isómero β ; por tal razón,

la proporción utilizada de reactivos y las condiciones de pH, entre 5 y 6, son controladas para favorecer la formación del isómero β ; el ácido silícico se transforma en ácido β -silicomolibdico para posteriormente reducirlo, mediante una solución de ácido ascórbico, a azul de molibdeno, que se caracteriza por ser un complejo colorido bastante estable (Koroleff *et al.*, 1977).

Posteriormente, la concentración de sílice se determina mediante una reacción colorimétrica. El azul de molibdeno, así formado, tiene un pico de absorción en una longitud de onda de 810nm. La lectura de la absorbancia se hace mediante un filtro de esta longitud de onda la cual se transforma en una señal digital expresada en $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Si para determinar la concentración de sílice en la muestra.

6.1.2 Determinación de Sílice Particulado Biogénico y Litogénico

La determinación de sílice particulado se realizó mediante el método descrito por Ragueneau y Tréguer (1994), el cual consiste en llevar a cabo dos digestiones alcalinas NaOH y una tercera ácida con HF (Figura 7). Este procedimiento disuelve por fracciones operacionales el sílice particulado, para determinar las cantidades presentes como sílice biogénico y como sílice litogénico.

En la primera parte del método, los filtros de policarbonato utilizados en la filtración de las muestras para sílice particulado se introdujeron en tubos de polimetilpentano a los cuales se les añadieron 4 mL de NaOH 0.2 M, cuidando en todo momento que el filtro se mantuviera en el fondo y cubierto completamente por el NaOH. Los tubos se introdujeron en un autoclave y se mantuvieron a una temperatura de 100 °C durante 40 min. Transcurrido este tiempo, se enfriaron introduciéndolos en un recipiente con agua a temperatura ambiente y se les añadió 1 mL de HCl 1 M para detener la digestión. Posteriormente, se centrifugaron durante 10 min a 2,500 rpm (FCR = 500 x g), lo cual permitió separar el material en suspensión del sobrenadante.

Con una pipeta de plástico se retiraron del sobrenadante alícuotas de 0.5 mL y 2 mL para realizar los análisis de sílice y de aluminio respectivamente. Las muestras fueron diluidas

con 10 mL de agua desionizada y almacenadas en frascos de plástico de 30 mL. Durante esta primer digestión alcalina se asume que todo el SiB y sólo una parte del SiL fueron convertidos en Si(OH)_4 (Figura 6).

Al finalizar la primera digestión, los filtros se lavaron añadiendo 13 mL de agua desionizada a los tubos de polimetilpentano, se agitaron y centrifugaron durante 15 minutos a 2,500rpm. Posteriormente se retiró y desechó del sobrenadante una alícuota de 10.5 mL quedando solamente en el tubo un remanente de 2.5 mL. Al finalizar el tercer enjuague se evaporaron los residuos del sobrenadante (2.5 mL) dentro de una estufa a una temperatura constante de 60 °C.

Una vez secos los filtros, se llevó a cabo una segunda digestión alcalina, exactamente igual a la primera, en la cual se determinó la proporción Si:Al, característica de los minerales contenidos en las muestras. Esta relación se utiliza para corregir la interferencia causada por los minerales de silicatos que llegan a meteorizarse durante la primera digestión. Después de tomar las alícuotas para el análisis de las concentraciones de Si y Al de la segunda digestión, los filtros fueron lavados y secados, como se explicó con anterioridad.

Posteriormente se comprimieron los filtros para retirarles cualquier burbuja de aire y se les añadieron 0.2 mL de HF 0.2 M. Se dejaron tapados y a temperatura ambiente durante 48 h dentro de una campana de extracción. Transcurrido el tiempo se añadieron 7 mL de agua desionizada a los tubos y se retiraron los filtros. Se tomaron alícuotas de 1 mL del sobrenadante y se aforaron con 100 mL de agua desionizada, obteniéndose una concentración final de 0.002 M.

Los análisis para las cuantificaciones de aluminio fueron realizados con un analizador de Plasma Acoplado por Inducción (ICP), en el Laboratorio de Fisicoquímica Marina del ICML, UNAM. Como se mencionó anteriormente, las muestras de sílice fueron analizadas como sílice soluble reactivo en el analizador de flujo segmentado (AFS).

Una vez obtenidas las concentraciones de sílice y aluminio $[(S)_1, (Al)_1]$ de la primera y la segunda digestión $[(Si)_2, (Al)_2]$, se calculó la concentración de SiB contenido en el material particulado de las muestras estudiadas utilizando la relación $(Si:Al)_2$ calculada a partir de los valores obtenidos en la segunda digestión alcalina. La siguiente fórmula permite eliminar la interferencia causada por el material litogénico, para así determinar la concentración correcta de SiB.

Ecuación 1. Ecuación para determinar la concentración de sílice biogénico particulado

$$SiB = [Si]_1 - [Al]_1 \times [Si:Al]_2$$

Donde:

SiB= concentración de sílice biogénico particulado.

$[Si]_1$ = concentración de sílice biogénico aparente, primera digestión.

$[Al]_1$ = concentración de aluminio, primera digestión.

$[Si:Al]_2$ = relación sílice-aluminio, segunda digestión.

Durante la tercera digestión, el HF permite la disolución del sílice particulado restante en los filtros ($[Si]_3$). La concentración de los minerales de sílice o SiL en la muestra se determinó empleando la siguiente fórmula:

Ecuación 2. Ecuación para la determinación del sílice litogénico particulado

$$SiL = [Si]_3 + [Si]_2 + ([Si]_1 - [SiB])$$

Donde:

SiL = sílice litogénico particulado.

SiB= sílice biogénico particulado.

$[Si]_1$ =concentración de sílice biogénico aparente.

$[Si]_2$ =concentración de sílice obtenido en la segunda digestión.

$[Si]_3$ = concentración de sílice obtenido en la tercera digestión

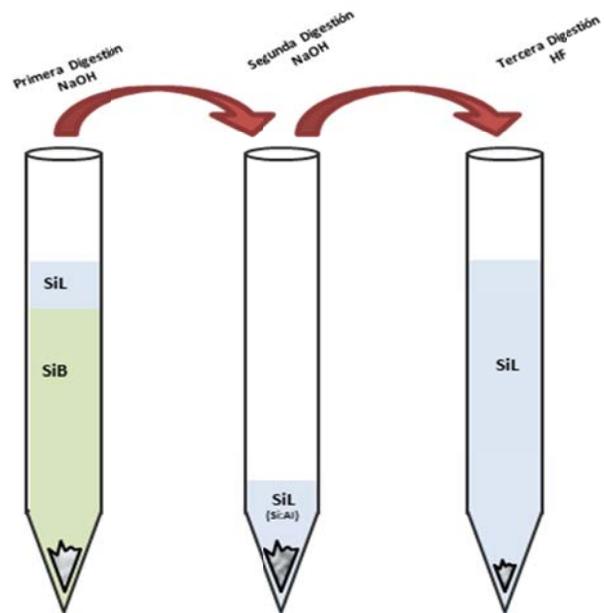
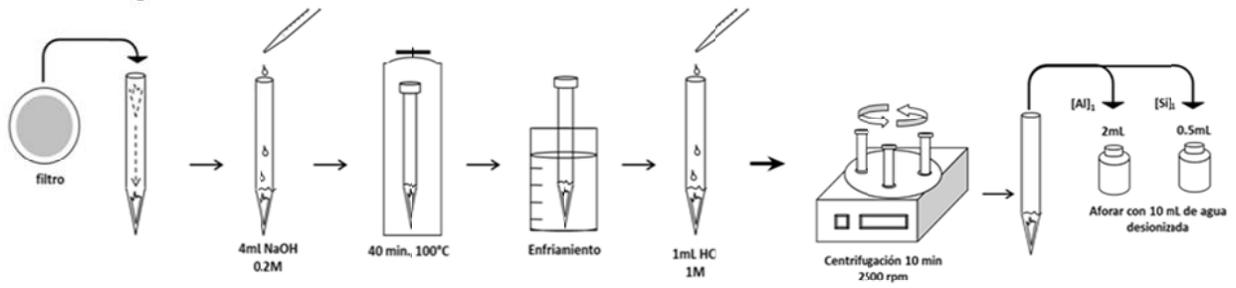
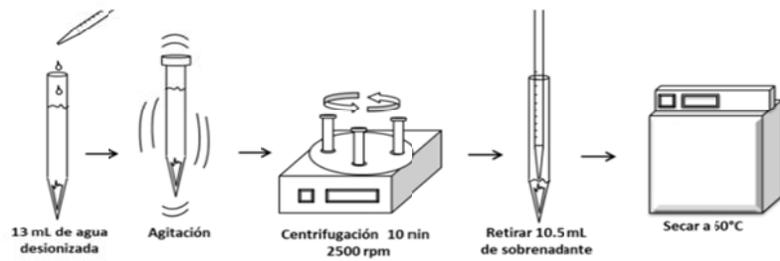


Figura 6. Meteorización hipotética de sílice particulado mediante el proceso de doble digestión alcalina.

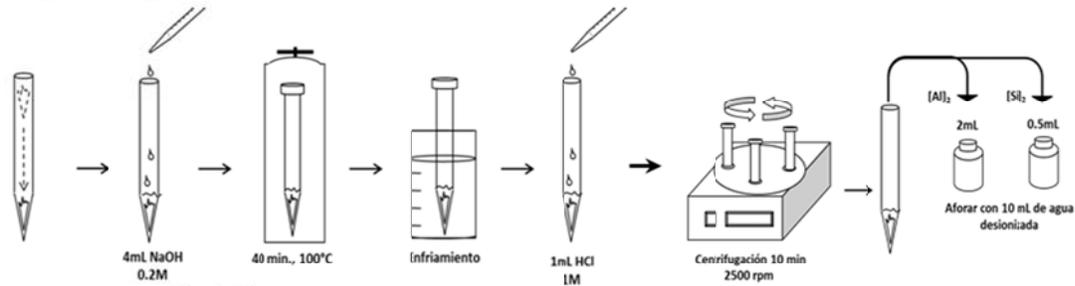
Primera digestión



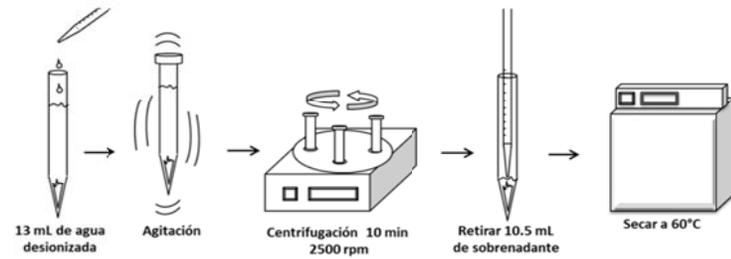
Lavado y secado del filtro



Segunda digestión



Lavado y secado del filtro



Tercera digestión

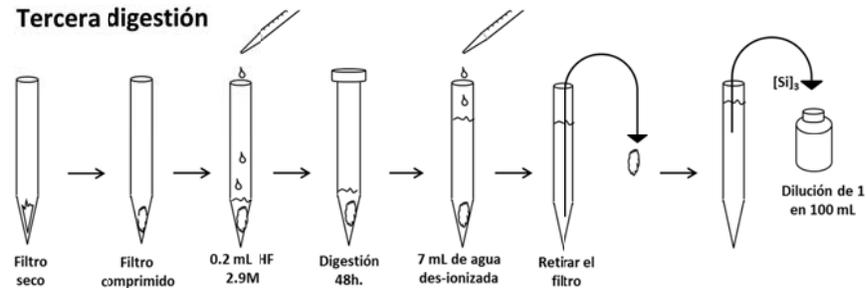


Figura 7. Esquema del método para la determinación de SiBP y SiLP

Una vez obtenidas las concentraciones de sílice biogénico y litogénico del material particulado, las magnitudes de los flujos de sedimentación fueron calculadas con la siguiente fórmula:

Ecuación 3. Cálculo de los flujos de sedimentación

$$F = (C V_{\text{trampa}}) / (t A_{\text{trampa}})$$

Donde:

F = flujos de sedimentación de material particulado.

C = masa total colectada.

t = duración del periodo muestreado.

V_{trampa} = volumen de la trampa.

A_{trampa} = área de recolección de la trampa.

6.1.3 Análisis Estadísticos

Se realizaron para cada mes análisis estadísticos como: la media aritmética, desviación estándar, rango y la determinación de los valores máximos y mínimos. Estos estadísticos se calcularon con las concentraciones obtenidas de SiBP y SiLP registradas en cada uno de los tres meses estudiados. El número de análisis por mes fue de 90 muestras de sílice, 60 muestras de aluminio y 15 muestras control (165 datos por mes).

Adicionalmente, para evaluar la existencia de valores anómalos o aberrantes, se realizó un análisis exploratorio de datos y se llevaron a cabo las pruebas de Thompson, Dixon y Grubbs, con el fin de identificar dichos valores y prevenir que pudieran alterar los resultados finales del estudio. Se utilizó también un diagrama de caja y bigotes para conocer de manera gráfica la distribución de dichos valores en relación con la mediana y los cuartiles del total de los datos utilizados.

7. Resultados y Discusión

7.1 Pruebas Preliminares

Con la finalidad de evaluar la efectividad del método, se realizaron ensayos con materiales de referencia de composiciones contrastantes, que incluyeran tanto una predominancia de sílice biogénico (e.g. diatomita), como de sílice litogénico (e.g. obsidiana y cuarzo). Estos ensayos se llevaron a cabo con muestras individuales de cada material, el cual fue triturado previamente para lograr un diámetro de grano fino, a modo de obtener una mayor descomposición durante el ataque químico.

En la Tabla 1 se presentan las concentraciones promedio de sílice y aluminio obtenidas mediante la técnica de doble digestión alcalina de diatomita, obsidiana y cuarzo. Durante la experimentación se tomaron 20 muestras de cada material de referencia, de las cuales en promedio se pesaron 0.63 mg de diatomita, 0.62 mg de obsidiana y 0.62 mg de cuarzo.

Tabla 1. Concentraciones de sílice y aluminio ($\mu\text{mol L}^{-1}$) en diatomita, obsidiana y cuarzo.

Material de Referencia	Primera Digestión (NaOH 0.2 M)		Segunda Digestión (NaOH 0.2 M)		Tercera Digestión (HF 2.9 M)	(Si:Al) ₂
	Si ₁	Al ₁	Si ₂	Al ₂	Si ₃	
Diatomita	7962.5	11.6	335.5	12.9	1139.5	26.3
Obsidiana	189.3	6.5	211.8	6.5	7439.5	32.6
Cuarzo	15	N.D.	7.3	N.D.	4639.1	-----

Si₁, Al₁, Si₂, Al₂, Si₃: concentraciones de sílice y aluminio en $\mu\text{mol L}^{-1}$ obtenidas durante la primera, segunda y tercera digestión, (Si:Al)₂: relación sílice-aluminio, N.D.: concentración no detectable (<0.04 $\mu\text{mol L}^{-1}$)

Como puede observarse en la tabla anterior, la máxima disolución varió según el material considerado. Tal fue el caso de la diatomita, material de origen biogénico que presentó su máxima disolución en medio alcalino. Sin embargo, la presencia de aluminio en la muestra habla de su combinación con polvos de sílice litogénico en esta muestra, partiendo del supuesto de que los minerales encontrados en la diatomita son aluminosilicatos, lo cual se corrobora al poner la muestra bajo la acción del HF, ácido capaz de disolver la mayoría de los silicatos, observándose una concentración de sílice de 1.14 mmol L^{-1} .

Caso contrario fue el de los materiales de origen litogénico, como la obsidiana y el cuarzo, que al estar conformados mayoritariamente por sílice litogénico, mostraron la máxima meteorización bajo la acción del HF, con un promedio de 7.44 mmol L^{-1} y 4.64 mmol L^{-1} , respectivamente.

Durante los análisis, la obsidiana mostró una concentración de aluminio de $6.5 \text{ } \mu\text{mol L}^{-1}$ en la primera y segunda digestión, por tratarse del mismo material litogénico con una composición definida. No obstante, la diatomita presentó concentraciones de aluminio de $11.6 \text{ } \mu\text{mol L}^{-1}$ y $12.9 \text{ } \mu\text{mol L}^{-1}$ durante las dos primeras digestiones; esto se debe a que, comúnmente, los yacimientos de diatomita se encuentran mezclados con diferentes tipos de materiales arcillosos (Calvo *et al.*, 2000).

Para la diatomita y obsidiana se calculó la relación sílice: aluminio con los valores obtenidos en la segunda digestión, permitiendo realizar la corrección de la interferencia causada por la meteorización de una fracción del material litogénico, junto con la disolución del biogénico durante la primera digestión, parte de la técnica, en donde se establece que debido a las condiciones básicas del medio, sólo el material biogénico se disuelve. Esta corrección no se realizó para el cuarzo, al no presentar concentraciones de aluminio durante los análisis.

Finalmente, una vez corregidas las concentraciones de sílice, se calculó el porcentaje de sílice biogénico y litogénico del material particulado estudiado en las pruebas preliminares. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Porcentaje de sílice biogénico y sílice litogénico contenidos en muestras de diatomita, de obsidiana y de cuarzo.

Material de Referencia	% de SiB	% de SiL
Diatomita	81.1	18.9
Obsidiana	0	100
Cuarzo	0.26	99.8

SiB: sílice biogénico, SiL: sílice litogénico, %: porcentaje

Los análisis realizados a la diatomita mostraron que la composición de esta muestra fue del 81 % de sílice biogénico, valor consistente con lo reportado por Cuna (1997), para el mismo yacimiento proveniente de las minas de El Lucero y Santa Bárbara en Tlaxcala, México, los cuales se caracterizan por los depósitos de diatomita de alta pureza que van entre el 70 % y el 86 %.

De acuerdo con Klein y Hurlbut (1996), el cuarzo se considera el mineral más próximo a un compuesto puro, formado sólo por sílice y oxígeno. Los resultados obtenidos en la presente investigación son consistentes con lo anterior, dado que se determinó un 99.8 % de sílice litogénico en la muestra de cuarzo. El 0.26 % restante del cuarzo quedó clasificado como sílice biogénico, al no contar con aluminio en su estructura que permitiera realizar su correcta clasificación, según la metodología planteada. Por lo anterior, el cuarzo es un excelente ejemplo de la interferencia producida por sílice litogénico en la determinación de la concentración efectiva de sílice biogénico, aunque dicha diferencia también podría deberse al error implícito en el método.

En el caso de la obsidiana, a pesar de haber presentado concentraciones de sílice durante las tres digestiones (Tabla 1), el contenido de aluminio en su conformación permitió hacer su correcta clasificación como sílice litogénico. El porcentaje de recuperación para la

obsidiana fue del 87.6 % (Tabla 3), valor equivalente al mencionado por Cobean (2003), quien hace referencia a que la composición mayoritaria de la obsidiana es de sílice, la cual va del 70 % al 75 %, siendo el resto otro tipo de compuestos.

7.2 Precisión y Porcentaje de Recuperación del Método

La precisión de la técnica se evaluó con base en el coeficiente de variación (% C.V.), obtenido del análisis de las réplicas independientes en los materiales de referencia. En la Tabla 3 se reporta la recuperación promedio determinada para cada compuesto, con sus respectivos intervalos de confianza ($\alpha=0.05$).

Tabla 3. Precisión y % de recuperación de las pruebas preliminares en análisis replicados

Material de Referencia	% Recuperación	d.e. (\pm)	C.V. (%)
Diatomita	93.3 \pm 5.7	6.5	7
Obsidiana	87.6 \pm 4.2	4.8	5
Cuarzo	81.3 \pm 5.3	6.1	7.5

d.e.: desviación estándar, C.V.: coeficiente de variación; \pm : intervalo de confianza.

En los resultados se observa que la recuperación promedio de los materiales de referencia se sitúa entre el 81 % y 93 %, con un coeficiente de variación < 8 % en todos los casos, mostrando un método bastante preciso por la relativamente baja dispersión entre los valores de las muestras analizadas para cada material. Asimismo, la desviación estándar promedio de las pruebas preliminares, mostró que el error del método es de 3.5 $\mu\text{mol L}^{-1}$ para el sílice biogénico y de 3.4 $\mu\text{mol L}^{-1}$ para el sílice litogénico.

De acuerdo a lo anterior se acepta la hipótesis 1, donde se plantea que “el método de doble digestión alcalina publicado por Ragueneau *et al.* (2005) para la determinación de sílice biogénico en el material particulado, con corrección por la interferencia de sílice litogénico

y diseñado para aguas costeras y estuarinas, puede ser utilizado exitosamente también en aguas epicontinentales, como en el lago cráter Alchichica”. La coherencia de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas con el material de referencia dominante en el seston del lago Alchichica (Oseguera *et al.*, 2010) mostró que la técnica de doble digestión alcalina puede ser utilizada con éxito para la correcta determinación de sílice biogénico y litogénico particulado en un mismo análisis. Asimismo en esta sección se cumplieron los dos primeros objetivos planteados en nuestro estudio.

7.3 Análisis de las Muestras de Agua Colectadas en el Lago Alchichica: Aplicación de la Técnica de Doble Digestión Alcalina

Alchichica, al igual que la mayoría de los lagos tropicales profundos, se considera como un lago monomítico cálido, comenzando su etapa de circulación aproximadamente de finales de diciembre y hasta finales de marzo, manteniéndose estratificado el resto del año. Debido a que el lago presenta un comportamiento térmico predecible e iterativo año con año, fue posible concentrar el esfuerzo de este trabajo en el estudio de la distribución vertical y temporal del sílice particulado a lo largo de la columna de agua en tres muestreos, representativos de condiciones limnológicas contrastantes dentro del ciclo anual. Estas condiciones comúnmente se presentan durante el mes de febrero, periodo en el que el lago se encuentra en circulación; septiembre, parte del año en donde se presenta la estratificación bien establecida, y noviembre, que comprende la estratificación tardía.

7.3.1 Análisis Exploratorio de Datos

En la Tabla 4 se presentan las concentraciones de sílice biogénico y litogénico particulado promedio, obtenidas durante los análisis de las muestras correspondientes a los meses de febrero, septiembre y noviembre del año 2008 en el lago Alchichica.

Tabla 4. Concentraciones de SiBP ($\mu\text{mol L}^{-1}$) y SiLP ($\mu\text{mol L}^{-1}$) en el lago Alchichica.

Febrero			Septiembre			Noviembre		
Z (m)	SiBP ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	SiLP ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	Z (m)	SiBP ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	SiLP ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	Z (m)	SiBP ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	SiLP ($\mu\text{mol L}^{-1}$)
0	3.7	16.7	0	20.8	42.0	0	30.2	355
5	11.8	10.7	5	29.8	10.4	5	46.6	37.0
10	28.9	12.2	10	28.3	18.8	10	47.0	35.8
15	38.1	7.9	15	32.7	21.4	20	51.8	13.8
20	42.3	10.2	20	38.1	8.5	25	46.9	14.0
25	76.7	24.2	25	18.2	26.4	30	37.7	25.2
30	78.0	31.5	29	30.2	17.1	34	109.7	22.6
40	55.3	18.7	40	21.1	23.1	40	18.0	24.2
50	86.1	21.3	50	10.7	18.1	50	44.7	34.8
60	123	22.0	60	31.3	14.3	60	7.7	28.3
media	54.3	17.5	media	26.1	20.0	media	45.6	59.1
d.e.	36.8	7.4	d.e.	8.2	9.5	d.e.	27.1	104.4
mínimo	3.7	7.9	mínimo	10.7	8.5	mínimo	7.7	13.8
máximo	123	31.5	máximo	38.1	42.0	máximo	109.7	355

SiBP: sílice biogénico particulado, SiLP: sílice litogénico particulado, d.e.: desviación estándar

Un análisis exploratorio de estos datos permitió identificar un valor extraordinariamente alto ($355 \mu\text{mol L}^{-1}$), atípico en relación con el resto, para la concentración de sílice litogénico obtenida en la muestra tomada de la superficie durante el mes de noviembre.

Para verificar el grado de anomalía de este valor y evaluar si era estadísticamente aberrante, se realizaron las pruebas de Grubbs (T) y Dixon (Q), con las concentraciones promedio del mes de noviembre ($n=10$); y la técnica de Thompson (τ), en el total de las muestras de sílice litogénico para los tres meses de estudio ($n=90$). En la Tabla 5 se muestran los resultados.

Tabla 5. Pruebas de Dixon (Q) y Grubbs (T) y Thompson (τ) para la determinación de datos atípicos.

Dixon	$Q = \frac{x_N - x_{N-1}}{x_N - x_1}$	n	Q	Qcrit. (tablas)	Q > Qcrit.
		10	0.932	0.477	outlier
Grubbs	$T = \frac{ x_i - \bar{x} }{s}$	n	T	Tcrit. (tablas)	T > Tcrit
		10	2.837	2.176	outlier

x_i, x_N : 355 $\mu\text{mol L}^{-1}$; x_1 : min; \bar{x} : media (59.1); s.: desviación estándar (104.4); crit.: valores críticos; *outlier*: valor atípico o aberrante.

Thompson	$\delta_i = x_i - \bar{x} $	n	δ_i	τ (tablas)	$\delta_i > \tau * \text{d.e.}$
		90	323.1	117.9	outlier

x_i : 355 $\mu\text{mol L}^{-1}$; \bar{x} : media (32.2); d.e.: desviación estándar (61.6); τ (tablas): 1.94; *outlier*: valor atípico o aberrante.

Todos los métodos para la determinación de valores atípicos mostraron que el dato de la concentración superficial de sílice litogénico determinada para el mes de noviembre es un dato anómalo, el cual podría alterar de manera significativa el resultado final de nuestro estudio.

Adicionalmente, para evaluar gráficamente esta posible afectación, se realizó un diagrama de caja (Figura 8) con todas las concentraciones de SiL, en el cual se aprecia lo alejado que está este dato del resto. Este diagrama muestra que la distribución de las concentraciones es prácticamente simétrica, exceptuando el valor aberrante de 355 $\mu\text{mol L}^{-1}$. Asimismo, utilizando los cuartiles en el conjunto de datos, se calcularon las fronteras interiores y exteriores del diagrama de caja, encontrándose que la concentración de sílice litogénico en la superficie del lago Alchichica para el mes de noviembre es un valor atípico extremo.

En conjunto, todos estos elementos indican que este valor no corresponde a la misma población que el resto de los datos, por lo que se decidió no considerarlo en el análisis de los patrones verticales y justificando de este modo su eliminación.

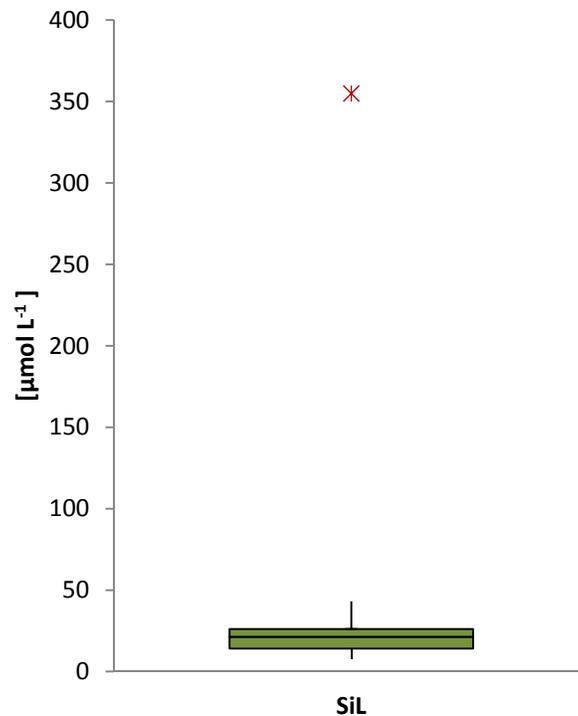


Figura 8. Diagrama de caja para las concentraciones de SiLP del mes de febrero, septiembre y noviembre del 2008. La línea central indica la mediana, la caja incluye al 50% de los datos y los bigotes el 95% de ellos.

El hecho de que este dato sea aberrante con respecto al resto, podría deberse a algún error en el proceso de determinación de la concentración del SiL. Como parte de las estrategias para detectar errores de este tipo y para reducir la incertidumbre, durante la colecta de muestras se obtuvieron tres réplicas de campo para cada punto de muestreo. Sin embargo, en este caso, las concentraciones de sílice litogénico superficial fueron relativamente similares en las tres réplicas: $380 \mu\text{mol L}^{-1}$, $351 \mu\text{mol L}^{-1}$ y $335 \mu\text{mol L}^{-1}$. El hecho de tener

valores del mismo orden de magnitud en tres diferentes muestras hace poco probable que estos valores se deban a algún error analítico, lo cual hace suponer que estos resultados reflejan la realidad en el momento de este muestreo. Al respecto, consideramos que podría tratarse de una condición real, pero poco frecuente, debida a un evento esporádico de flujo de SiL hacia la superficie del lago (p. ej., una tolvana, las cuales han sido observadas en algunas ocasiones, cubriendo incluso de polvo toda la zona del lago), quedando registrado sólo en la parte superficial del lago y durante un breve lapso de tiempo.

7.3.2 Contenido de Sílice Biogénico y Litogénico en el Material Suspellido de la Columna de Agua del Lago Alchichica

En la Tabla 6 se presentan los parámetros estadísticos básicos de los contenidos de ambos tipos de sílice en cada una de las tres épocas del año analizadas. Se observa que en el muestreo del mes de febrero los valores de sílice biogénico fluctuaron entre 3.7 $\mu\text{mol L}^{-1}$ y 123 $\mu\text{mol L}^{-1}$. Estos valores corresponden a las concentraciones mínima y máxima registradas para todo el periodo de estudio. Adicionalmente, la elevada desviación estándar de febrero ($\pm 36.8 \mu\text{mol L}^{-1}$) muestra que durante este mes el tirante de agua presentó una alta variación en las concentraciones de sílice biogénico.

Tabla 6. Parámetros estadísticos de las concentraciones de sílice biogénico y sílice litogénico particulado en el lago Alchichica.

	Febrero		Septiembre		Noviembre	
	SiBP	SiLP	SiBP	SiLP	SiBP	SiLP
	($\mu\text{mol L}^{-1}$)					
media	54.3	17.5	26.1	20.0	44.0	26.2
d.e. (\pm)	36.8	7.4	8.2	9.5	27.1	8.7
mínimo	3.7	7.9	10.7	8.5	7.7	13.8
máximo	123	31.5	38.1	42.0	110	37.0
rango	119	23.6	27.4	33.5	102	23.2

SiBP: sílice biogénico particulado, SiLP: sílice litogénico particulado, d.e.: desviación estándar

En contraste, el mes de septiembre mostró un comportamiento homogéneo en los análisis de sílice biogénico, presentando una desviación estándar de $\pm 8.2 \mu\text{mol L}^{-1}$ y concentraciones que fluctuaron entre los $10.7 \mu\text{mol L}^{-1}$ y los $38.1 \mu\text{mol L}^{-1}$. Caso contrario fue el de noviembre, periodo que mostró valores de material biogénico similares a los de febrero, que oscilaron entre los $7.7 \mu\text{mol L}^{-1}$ y $110 \mu\text{mol L}^{-1}$ con una desviación estándar de $8.7 \mu\text{mol L}^{-1}$.

Como se observa en la Figura 9, las concentraciones de sílice litogénico fueron similares en las tres condiciones evaluadas durante el periodo de estudio. En el mes de febrero, septiembre y noviembre, las concentraciones mínimas fueron de $7.9 \mu\text{mol L}^{-1}$, $8.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ y $13.8 \mu\text{mol L}^{-1}$. Asimismo, las concentraciones máximas fueron de $31.5 \mu\text{mol L}^{-1}$, $42 \mu\text{mol L}^{-1}$ y $37 \mu\text{mol L}^{-1}$, respectivamente, lo que respalda la existencia de una distribución similar del material suspendido de origen alóctono en la columna de agua durante los tres meses estudiados.

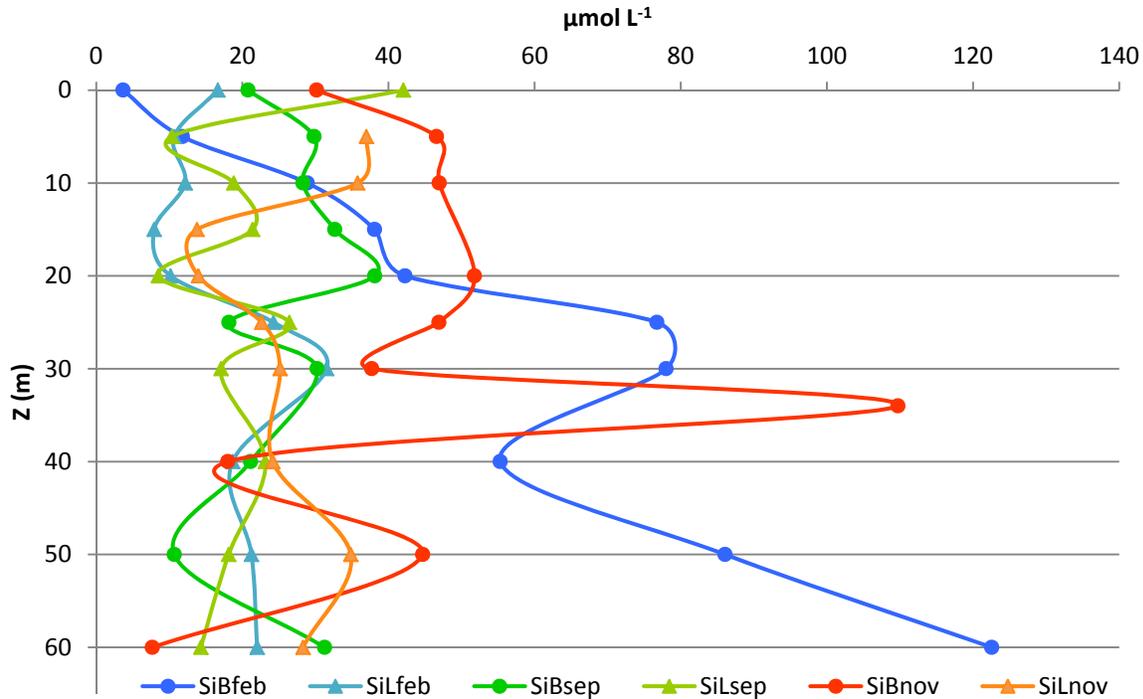


Figura 9. Concentraciones de sílice biogénico (SiB) y sílice litogénico (SiL) en el mes de febrero (feb), septiembre (sep) y noviembre (nov) del año 2008.

En la figura anterior se ve que las concentraciones de sílice biogénico y litogénico fueron de magnitudes similares en la columna de agua únicamente durante el mes de septiembre, con un valor promedio de $26 \mu\text{mol L}^{-1}$ y $20 \mu\text{mol L}^{-1}$ respectivamente. Tomando en cuenta el conjunto de todos los datos, no se observa la existencia de una relación clara entre ambos parámetros. La Figura 10 muestra, claras diferencias en la distribución estadística de ambos parámetros, presentando el sílice biogénico tanto una mayor concentración media y mediana, como una mayor dispersión que el litogénico, lo que puede deberse a su origen y diferente naturaleza.

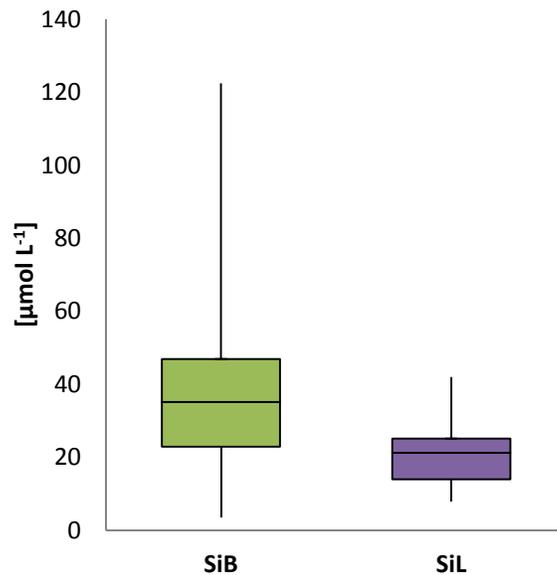


Figura 10. Diagrama de caja para sílice biogénico (SiB) y sílice litogénico (SiL)

En la Figura 11 se muestran las distribuciones poblacionales de los datos de SiB y SiL para el conjunto de datos de los tres meses de estudio. Se aprecia que las concentraciones de sílice biogénico predominantes se encontraron entre los $20 \mu\text{mol L}^{-1}$ y $50 \mu\text{mol L}^{-1}$, seguidas de manera importante por valores entre los $10 \mu\text{mol L}^{-1}$ y $20 \mu\text{mol L}^{-1}$.

Del mismo modo, las concentraciones observadas en una sola ocasión se presentaron en los intervalos de 80-90 $\mu\text{mol L}^{-1}$, de 100-110 $\mu\text{mol L}^{-1}$ y de 110-120 $\mu\text{mol L}^{-1}$. En el caso del sílice litogénico, el 70 % de los valores se encontraron entre los 10-30 $\mu\text{mol L}^{-1}$, seguidas en un menor porcentaje por concentraciones entre los intervalos de 0-10 $\mu\text{mol L}^{-1}$ y de los 30-40 $\mu\text{mol L}^{-1}$; observándose un sólo dato en el intervalo de 40-50 $\mu\text{mol L}^{-1}$. De manera general, se observa que la distribución del SiB es más amplia que la del SiL, mostrando un mayor rango de concentraciones, mientras que la de SiL muestra un rango relativamente estrecho de variación.

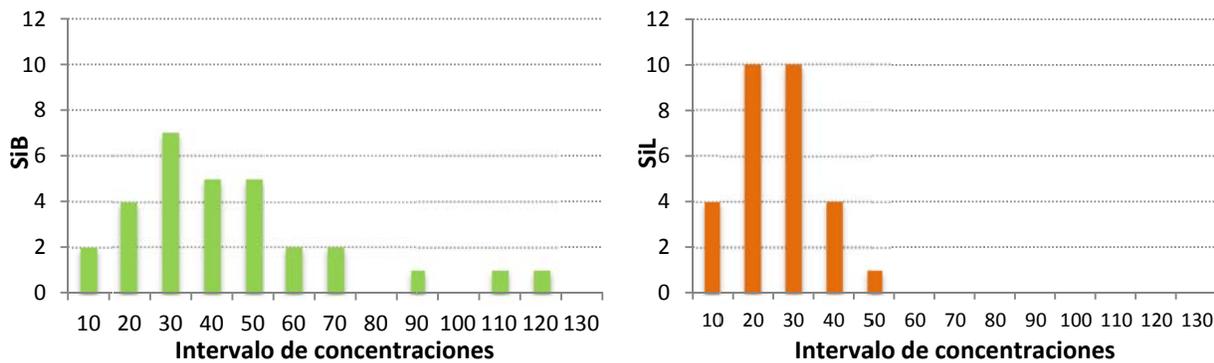


Figura 11. Frecuencia de las concentraciones de sílice biogénico (SiB) y sílice litogénico (SiL) durante los meses de febrero, septiembre y noviembre del año 2008.

En general, la concentración de sílice biogénico detectada con mayor frecuencia durante todos los análisis del estudio fue de 38.0 $\mu\text{mol L}^{-1}$, presentando una media de 41.5 $\mu\text{mol L}^{-1}$, este valor fue el doble del registrado para sílice litogénico, el cual mostró una concentración promedio de 21.1 $\mu\text{mol L}^{-1}$ con una moda de 14.0 $\mu\text{mol L}^{-1}$. Su desviación estándar de solamente $\pm 9.0 \mu\text{mol L}^{-1}$ sugiere una entrada de carácter relativamente constante de material litogénico durante los meses estudiados.

Tabla 7. Acumulado de las concentraciones promedio de sílice biogénico (SiB) y sílice litogénico (SiL) para el periodo de estudio.

	SiBP ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	SiLP ($\mu\text{mol L}^{-1}$)
media	41.5	21.1
moda	38.0	14.0
mínimo	3.7	7.9
máximo	122.6	42.0
d.e. (\pm)	28.4	9.0

SiBP: sílice biogénico particulado, SiLP: sílice litogénico particulado, d.e.: desviación estándar.

A pesar de que el área de estudio se encuentra localizada dentro de la región semiárida de la cuenca Oriental, las concentraciones de sílice litogénico observadas fueron significativamente menores, que las obtenidas para el sílice biogénico ($t(29) = 4.06$, $p < 0.001$). Lo anterior concuerda con lo mencionado por Oseguera *et al.* (2010) y Ardiles *et al.* (2011), quienes hacen referencia a que el material particulado inorgánico que se encuentra suspendido en la columna de agua del lago Alchichica, está constituido principalmente por frústulos de diatomeas (sílice biogénico). Con base en estos resultados se acepta la hipótesis 2, la cual menciona que “El contenido de sílice particulado biogénico en la columna de agua del lago Alchichica es mayor que el de sílice particulado litogénico, debido principalmente a que la dominancia de la biomasa fitoplanctónica en el lago es de diatomeas”.

7.3.3 Corrección de la Interferencia Causada por el Material Litogénico

Durante el desarrollo de la experimentación con el método analítico propuesto, el valor de sílice obtenido en la primera digestión es denominado como sílice biogénico aparente (SiBa), concentración que puede llegar a discrepar hasta en un 90 % del valor real de sílice biogénico (Ragueneau y Tréguer, 1994).

Como se puede observar en la Figura 12, durante el periodo de circulación (febrero), las correcciones realizadas tomando en cuenta el SiBa fluctuaron en un rango estrecho, de solamente 0.7 % a 13 %, mostrando una distribución de material litogénico relativamente homogénea a partir de los 5 m de profundidad, producto del movimiento convectivo que realiza el lago durante esta parte del año. En contraste, durante el mismo periodo de tiempo, la muestra colectada en la superficie presentó la corrección máxima con un porcentaje de 39 %. Lo anterior se debe presumiblemente a que el polvo proveniente de la cuenca es arrastrado y depositado continuamente en la superficie del lago, donde su velocidad de sedimentación puede ser afectada por la tensión superficial y el diámetro de la partícula, generando la acumulación de este material.

El mes de septiembre mostró las máximas correcciones, del 42 %, también en la superficie del lago y a los 25 m de profundidad. Durante este época, el lago presenta una estratificación térmica (explicada en la siguiente sección), generando estratos con densidades diferentes y por lo tanto velocidades netas de sedimentación menores. Por tal razón, es común encontrar acumulación de material particulado entre las fronteras de estas capas, obteniéndose así este segundo porcentaje de corrección máximo dentro del metalimnion, capa que cubre desde los 17 m hasta los 30 m de profundidad.

En el mes de noviembre, las correcciones oscilaron entre $0.7 \mu\text{mol L}^{-1}$ y $35.2 \mu\text{mol L}^{-1}$, con un valor promedio en la columna de agua de $12.7 \mu\text{mol L}^{-1}$. El porcentaje de corrección máximo fue del 43 % y se observó a los 20 m profundidad, punto cercano a la base del epilimnion, estrato que va desde la superficie hasta los 28 m.

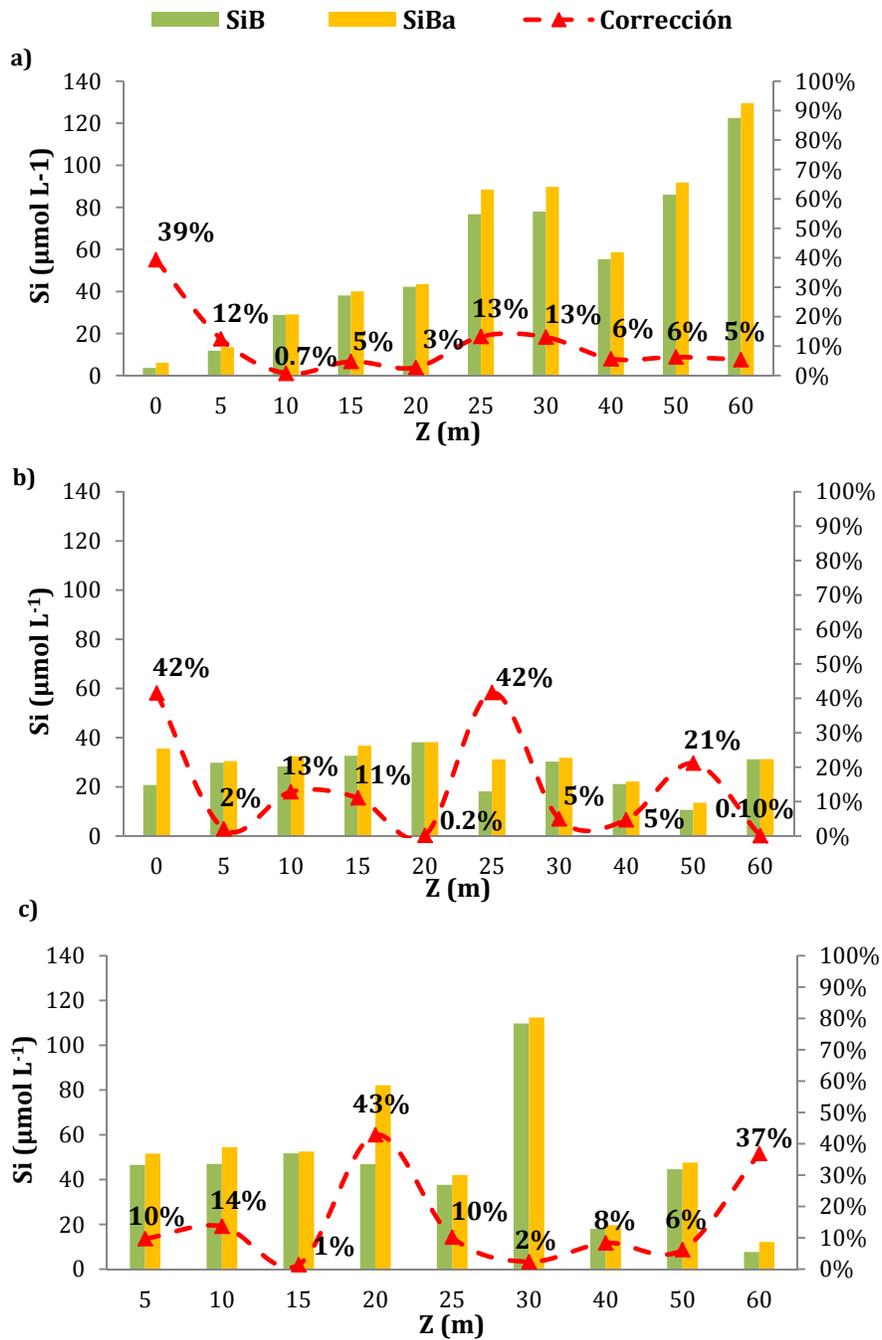


Figura 12. Porcentaje de corrección de sílice biogénico particulado para los meses de a) febrero, b) septiembre y c) noviembre.

7.4 Distribución Vertical y Temporal de Sílice Biogénico y Litogénico en Alchichica

7.4.1 Descriptores Limnológicos

7.4.1.1 Temperatura y Oxígeno Disuelto

7.4.1.1.1 Circulación

Durante la circulación (febrero), correspondiente al periodo más frío de la época de secas en Alchichica, se registraron temperaturas que fluctuaron entre los 14.7 °C y 17.7 °C, mostrando un comportamiento homogéneo a partir de los 10m de profundidad. Las concentraciones de oxígeno disuelto (O.D.), graficadas en paralelo a las temperatura en la Figura 13a, presentaron variaciones entre 4 mg L⁻¹ y 7 mg L⁻¹, alcanzándose la concentración mínima a los 60 m. Los valores de oxígeno disuelto en el lago mostraron un perfil vertical relativamente constante a lo largo de la columna de agua, indicando la ocurrencia de una circulación completa del lago, al no presentarse una capa anóxica cerca del fondo (Figura 13a).

7.4.1.1.2 Estratificación Bien Establecida

La estratificación térmica genera un gradiente de densidades a lo largo de la columna de agua, fraccionando al lago en tres estratos; epilimnion, metalimnion e hipolimnion, capas que varían en grosor y profundidad, dependiendo de la época del año.

Durante la estratificación bien establecida (septiembre), el epilimnion abarcó desde la parte superficial hasta los 17 m, con una variación de temperatura que osciló entre los 18.6 °C y los 19 °C (Figura 13b). El metalimnion, comprendió de los 17 m hasta los 30 m de profundidad, con temperaturas que variaron de los 15.1 °C a los 18.6 °C. Posteriormente, en el hipolimnion las temperaturas fueron bajas y relativamente constantes, variando solamente entre los 14.8 °C y los 15.1 °C.

Las concentraciones de oxígeno disuelto mostraron un patrón asociado a la distribución térmica, con altas concentraciones en el epilimnion que oscilaron entre los 6.9 mg L⁻¹ y los 7 mg L⁻¹. En la franja del metalimnion se presentó una marcada oxiclina, con una rápida depleción de oxígeno disuelto de aproximadamente 0.7 mg L⁻¹ por metro, que desemboca en un hipolimnion anóxico a partir de los 27 m (Figura 13b).

7.4.1.1.3 Estratificación Tardía

En la estratificación tardía (noviembre) se observó un patrón térmico menos contrastado. La temperatura del epilimnion fluctuó solamente entre los 16.1 °C y los 17.7 °C. El metalimnion se encontró a mayor profundidad, extendiéndose desde los 28 m hasta los 35 m, mostrando un menor rango de variación de la temperatura, entre los 15.1 °C y los 16.18 °C. El hipolimnion se mantuvo muy similar al de la estratificación temprana pero con menor espesor; sus temperaturas oscilaron entre los 14.8 °C y los 15 °C.

En contraste, el oxígeno disuelto mostró durante la estratificación tardía un patrón vertical tan intenso como en la temprana, pero desplazado hacia mayor profundidad. En el epilimnion ondeó entre los 6 mg L⁻¹ y 7 mg L⁻¹. A partir de los 30 m se presentó una oxiclina aún más marcada que en la estratificación temprana, en la cual las concentraciones de oxígeno disuelto descendieron rápidamente hasta los 35 m en que se alcanzó la anoxia que se mantuvo en el resto del hipolimnion (Figura 13c).

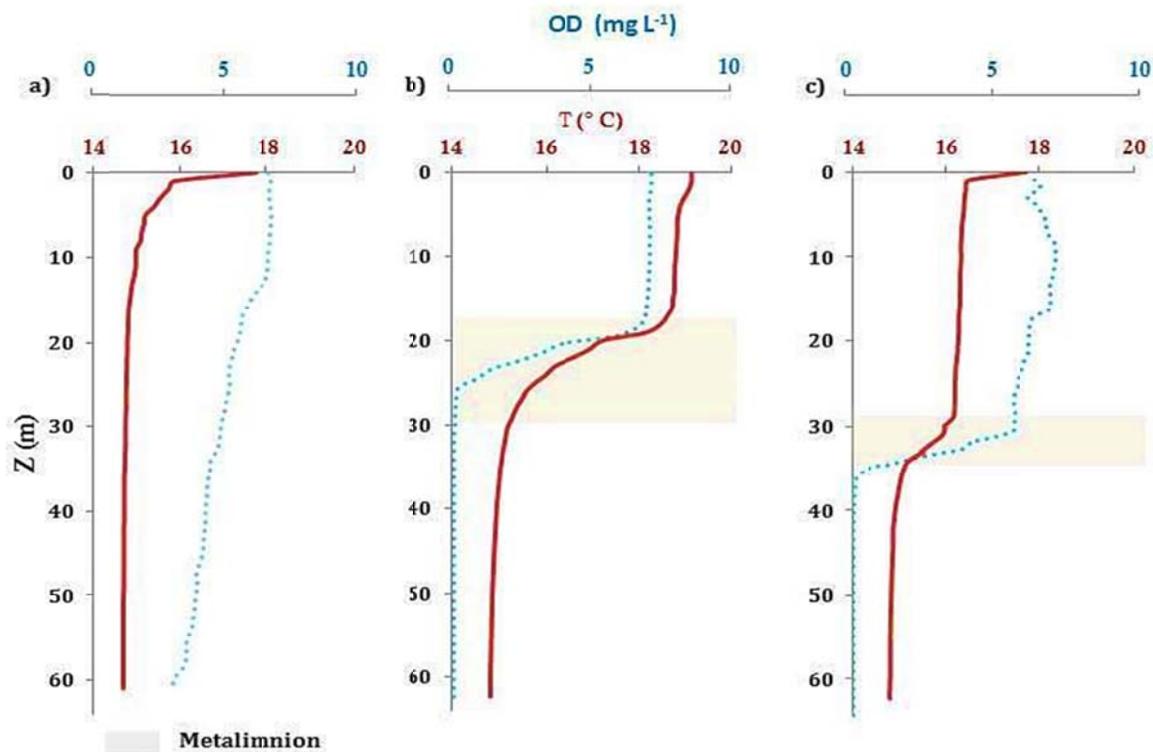


Figura 13. Perfil de Temperatura y oxígeno disuelto (O.D.) del año 2008 durante a) circulación, b) estratificación bien establecida y c) estratificación tardía.

7.4.1.2 Clorofila a (Cl-a) y Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR)

7.4.1.2.1 Circulación

Durante la circulación, la radiación fotosintéticamente activa (PAR, por sus siglas en inglés) penetró desde la superficie del lago hasta los 14 m, profundidad en donde se encuentra el 1% del PAR superficial. Asimismo, los perfiles de la fluorescencia natural de la clorofila a (Cl-a) medidos con el perfilómetro PNF-300 mostraron concentraciones que fluctuaron entre 0.42 $\mu\text{g L}^{-1}$ y 1.13 $\mu\text{g L}^{-1}$ (Figura 14).

7.4.1.2.2 Estratificación Bien Establecida

Durante la estratificación bien definida, el 1 % del PAR superficial, se presentó a los 25 m de profundidad. La concentración de clorofila a, mostró valores entre $0.22 \mu\text{g L}^{-1}$ y $1.66 \mu\text{g L}^{-1}$, presentando su valor máximo a los 29 m de profundidad.

7.4.1.2.3 Estratificación Tardía

En la estratificación tardía la zona fótica quedó delimitada a los 28 m de profundidad, convirtiéndose así en el mes con la zona fótica más profunda, comparada con la de los meses de febrero y septiembre. Los valores de clorofila a, fluctuaron entre los $0.12 \mu\text{g L}^{-1}$ y $1.42 \mu\text{g L}^{-1}$, con un valor promedio de $0.51 \mu\text{g L}^{-1}$.

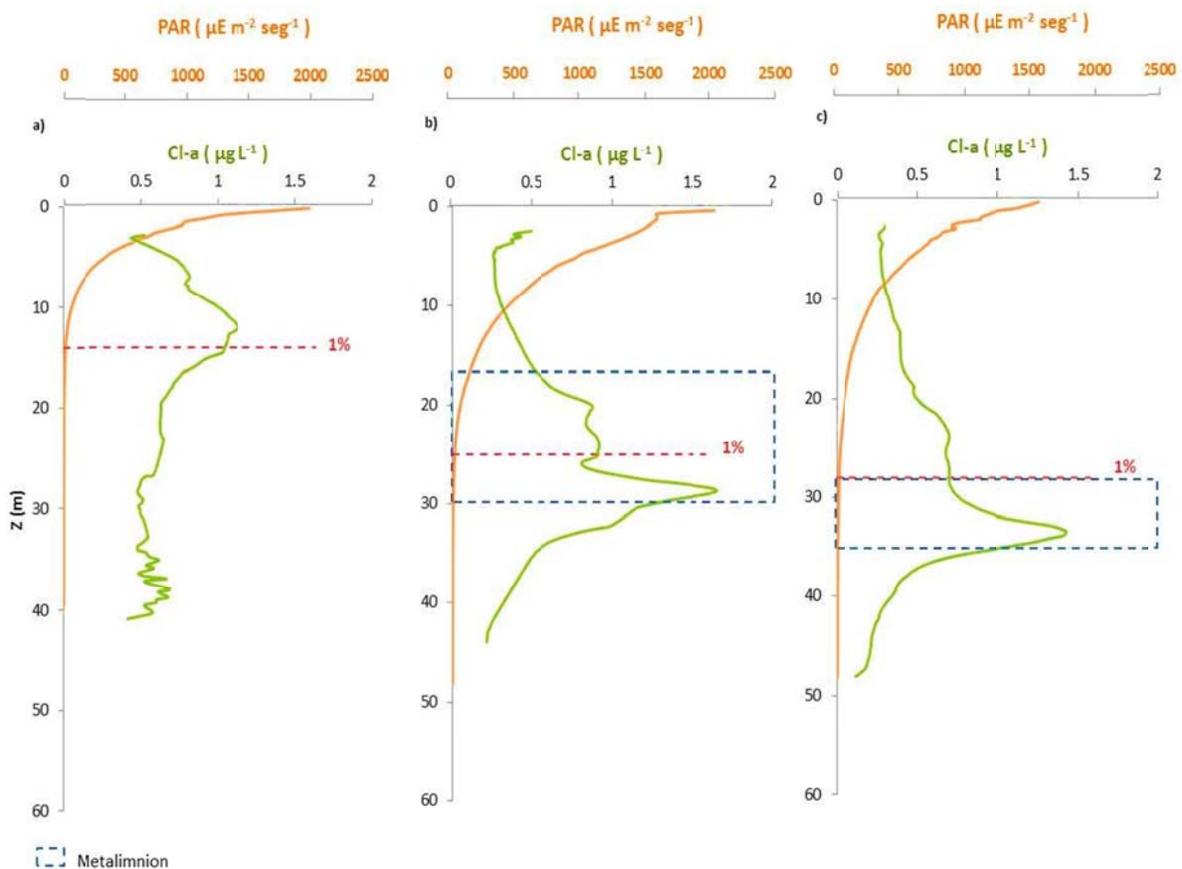


Figura 14. Perfiles de fluorescencia natural de clorofila a (Cl-a) y PAR durante la a) circulación, b) estratificación bien establecida y c) estratificación tardía durante el año 2008.

7.4.2 Distribución de Sílice Biogénico Particulado (SiBP)

7.4.2.1 Circulación

Las concentraciones de sílice biogénico particulado determinadas durante el periodo de circulación del lago mostraron un patrón de incremento con respecto a la profundidad (Figura 15). En aguas superficiales (0 m-20 m) los valores de sílice biogénico aumentaron desde los 3.7 $\mu\text{mol L}^{-1}$ hasta 42.3 $\mu\text{mol L}^{-1}$, y continuaron incrementándose a partir de los 25 m, presentando concentraciones desde los 55.3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ hasta los 122.6 $\mu\text{mol L}^{-1}$.

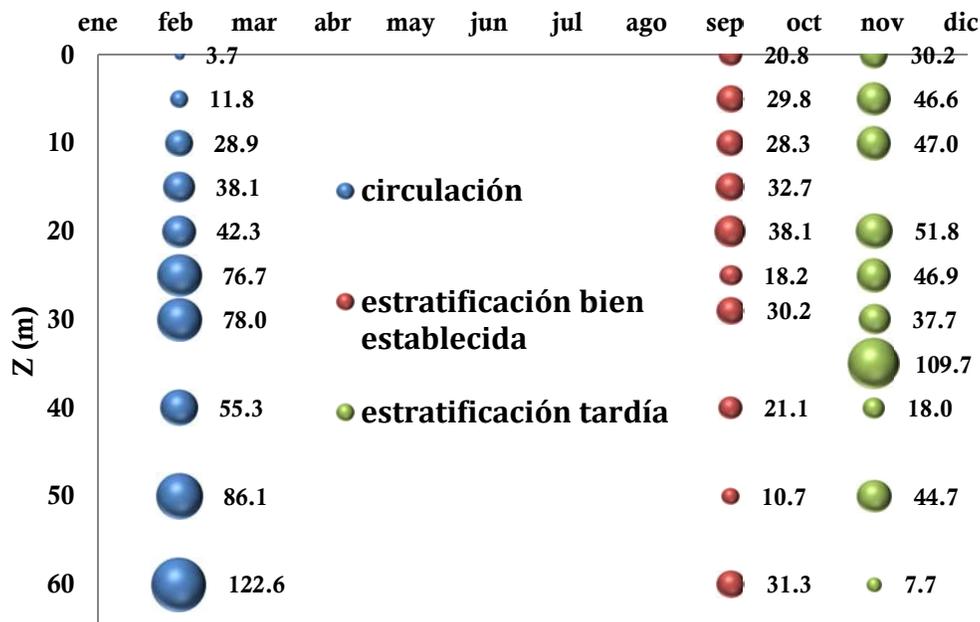


Figura 15. Distribución de sílice biogénico particulado (SiBP) en $\mu\text{mol L}^{-1}$ a lo largo de la columna de agua del lago Alchichica durante el año 2008.

Este patrón refleja una dominancia de los procesos de hundimiento y sedimentación del SiB, principalmente diatomeas o fracciones de éstas, en toda la columna de agua, lo cual es consistente con la ausencia de una estratificación que pudiera generar un hundimiento

diferenciado en función de los patrones de densidad. Esta condición, probablemente deriva en un importante flujo de SiB hacia el fondo del lago en esta época, dando como resultado sedimentos ricos en material particulado de origen biogénico, compuesto principalmente por células de diatomeas y frústulos vacíos, debido a que este organismo se presenta como el fitoplancton dominante durante los florecimientos.

En la Figura 16 se observa que existe una tendencia análoga entre el perfil de clorofila (Cl-a) y el de sílice biogénico particulado (SiBP) a lo largo de la columna de agua durante esta época del año. Desde la superficie y hasta los 15 m (zona eufótica), el incremento de las concentraciones de ambos parámetros es similar. Asimismo, en esta franja se presentaron las concentraciones más altas de oxígeno disuelto, lo que podría deberse a una alta actividad fotosintética en esta capa, lo cual es consistente con la existencia de concentraciones bajas, potencialmente limitantes, de sílice soluble reactivo (SiSR), las cuales fluctuaron entre $1.2 \mu\text{mol L}^{-1}$ y $1.6 \mu\text{mol L}^{-1}$, como se muestra en la misma figura.

A los 25 m de profundidad se observó un máximo relativo, tanto de Cl-a ($10.1 \mu\text{g L}^{-1}$) como de SiBP ($76.7 \mu\text{mol L}^{-1}$), además de una abrupta disminución en la concentración de SiSR que alcanzó un mínimo absoluto de $0.55 \mu\text{mol L}^{-1}$, todo en armonía con un máximo de abundancia de diatomeas en esta profundidad, dado que estos organismos fotosintetizadores se caracterizan por incorporar sílice disuelto del medio para formar su pared celular (Brönmark y Hansson, 2005), trayendo como consecuencia el agotamiento de este recurso observado.

Posteriormente, tanto las clorofilas como el SiBP continuaron aumentando, hasta alcanzar las concentraciones máximas de Cl-a ($11.7 \mu\text{g L}^{-1}$) y SiBP ($122.6 \mu\text{mol L}^{-1}$), que se presentaron en la máxima profundidad muestreada, ya muy cerca del fondo del lago. A pesar de que el lago se encuentra en movimiento convectivo, este patrón es consistente con lo planteado anteriormente sobre la mayor evidencia de sedimentación durante esta época en que no hay gradientes de densidad significativos. Por lo anterior, es de esperarse que se tenga una mayor cantidad de frústulos y células a mayor profundidad, debido a que los frústulos vacíos presentan menor resistencia a la sedimentación que las células vivas

(Brönmark y Hansson, 2005). Asimismo, el aumento de las concentraciones de SiSR en aguas profundas, indica probablemente la reducción en su consumo por la inactividad de las diatomeas en esta zona sin luz suficiente, desplazando en sentido inverso el balance entre consumo de SiSR y remineralización del SiBP.

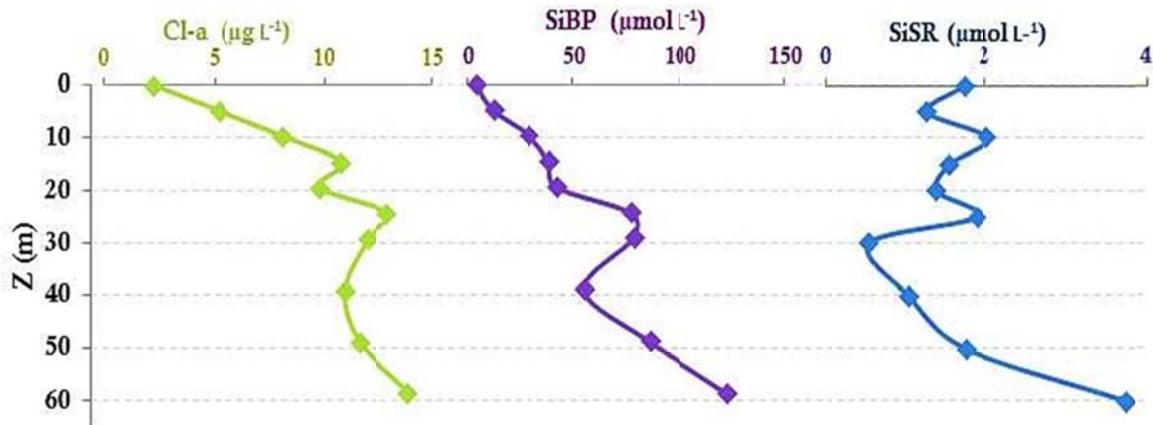


Figura 16. Perfiles de clorofila (Cl-a), sílice biogénico particulado (SiBP) y sílice soluble reactivo (SiSR) del lago Alchichica durante el periodo de circulación del año 2008.

Durante la circulación del lago, debido a que la mezcla vertical aumenta la disponibilidad de nutrientes y favorece a las diatomeas (Huisman *et al.* 2004), éstas alcanzan su mayor abundancia en el año. Esto se ve reflejado en altas concentraciones de Cl-a y mayor disponibilidad de SiBP en la columna de agua. Posiblemente por ello es que las concentraciones promedio de ambos parámetros mostraron una fuerte correlación (Figura 17) durante este periodo. Puede apreciarse que la relación no es lineal, sino logarítmica, y a mayores concentraciones de SiBP el aumento en la clorofila se va reduciendo, siguiendo la relación una tendencia asintótica.

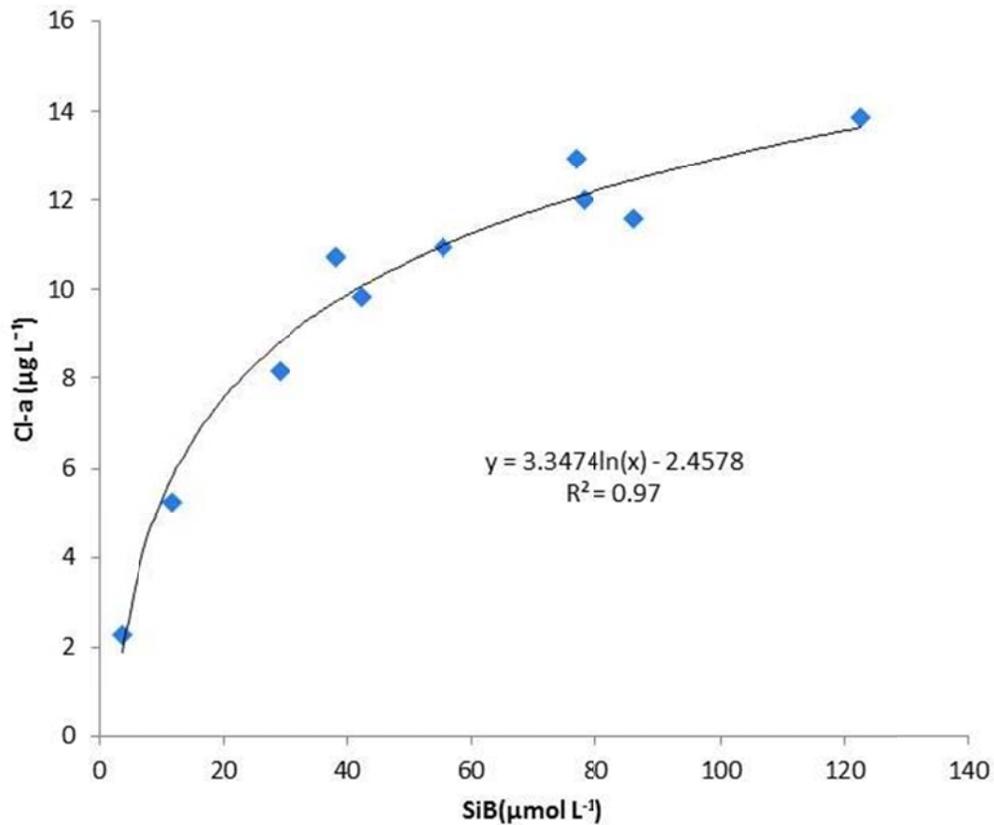


Figura 17. Correlación de SiBP y Cl-a durante la circulación del año 2008.

7.4.2.2 Estratificación Bien Establecida

En la zona del epilimnion durante la estratificación bien establecida (Figura 18) los valores de SiBP (promedio 27.9 µmol L⁻¹) se mantuvieron por arriba de las concentraciones obtenidas en aguas superficiales (0 m-15 m) durante la circulación (20.6 µmol L⁻¹). El patrón vertical del SiBP en esta época mostró gran similitud con el de la Cl-a, si bien ésta tuvo en el epilimnion concentraciones homogéneas y relativamente bajas (entre 0.7 µg L⁻¹ y 0.9 µg L⁻¹). Según Ardiles (2011), estas concentraciones son generadas por la presencia de *Chaetoceros elmorei* y *Cyclotella choctawhatcheana*. Probablemente la composición del material silíceo biogénico particulado en estas aguas superficiales está compuesto por células de *Cyclotella choctawhatcheana* y, en mayor proporción, por frústulos de *Cyclotella*

alchichicana, estos últimos transportados desde el metalimnion hasta el epilimnion mediante la turbulencia generada por mezclas irregulares que engrosan el epilimnion y liberan nutrientes del metalimnion (Lewis, 1990). Se atribuye a lo anterior la observación de concentraciones de SiSR (entre $5.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ y $10.72 \mu\text{mol L}^{-1}$) mayores a las presentadas durante el periodo de circulación.

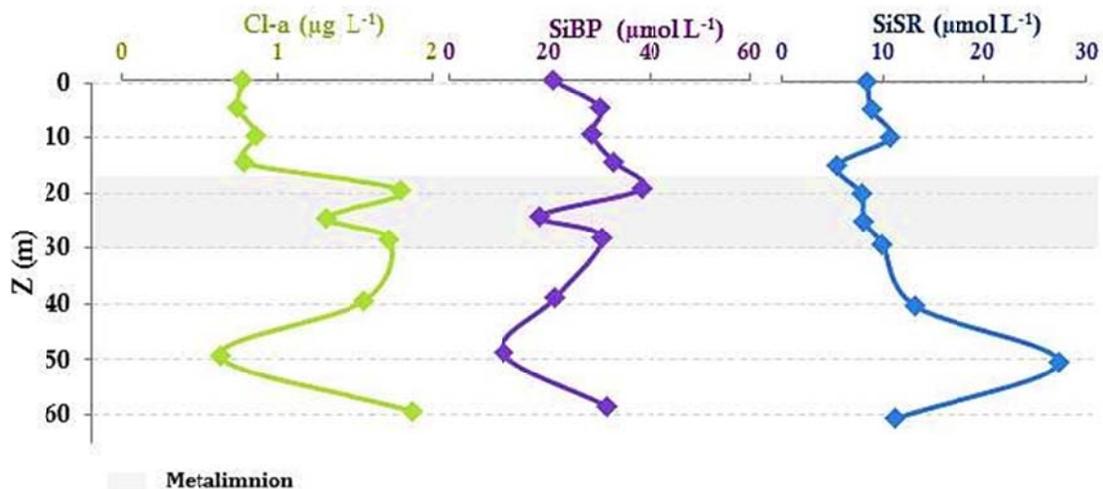


Figura 18. . Perfiles de clorofila (Cl-a), sílice biogénico particulado (SiBP) y sílice soluble reactivo (SiSR) del lago Alchichica durante el periodo de estratificación bien establecida del año 2008.

Durante la época de estratificación, el metalimnion desarrolla un máximo profundo de clorofila (DCM, por sus siglas en inglés) que según Ardiles *et al.* (2012) está dominado por *Cyclotella alchichicana* al presentar condiciones favorables para el desarrollo del fitoplancton, tratándose de un estrato con un fuerte gradiente de densidad que disminuye la sedimentación de las células de diatomeas, esto aunado a los mecanismos activos de los organismos para mantenerse en una posición durante un mayor tiempo (Brönmark y Hansson, 2005). Además, esta franja presenta condiciones de penumbra y la disponibilidad de nutrimentos exportados desde el hipolimnion como producto de las ondas internas que se generan en esta frontera (Filonov y Alcocer, 2002). Por lo anterior, las mayores

concentraciones de Cl-a ($1.7 \mu\text{g L}^{-1}$) y SiBP ($38.1 \mu\text{mol L}^{-1}$) durante este periodo estuvieron asociadas al metalimnion.

La formación de un metalimnion bien desarrollado provocó la disminución en la exportación hacia aguas profundas de sílice biogénico particulado y Cl-a, presentando ambos parámetros sus valores mínimos a los 50m. Contrario a lo anterior, en la Figura 18 se observa el incremento de las concentraciones de SiSR en el hipolimnion, como resultado de la remineralización de los nutrientes contenidos en la materia orgánica sedimentada durante la circulación.

7.4.2.3 Estratificación tardía

El periodo de estratificación tardía mostró similitud en la distribución de material silíceo biogénico particulado en la columna de agua, presentando tendencias análogas entre los perfiles de Cl-a y SiBP (Figura 19), y la presencia de un muy evidente máximo profundo de clorofila (DCM), al cual se asocia un máximo muy similar de SiBP, corroborando esta concordancia entre ambos parámetros, así como la dominancia de las diatomeas en este máximo característico de Alchichica durante esta época del año.

En la capa de mezcla (0 m-25 m) la concentración promedio de SiBP ($55 \mu\text{mol L}^{-1}$) fue mayor que la del periodo de circulación ($33.5 \mu\text{mol L}^{-1}$) y que la de la estratificación bien establecida ($27.9 \mu\text{mol L}^{-1}$). De igual forma, en este periodo se observó una tendencia creciente de las concentraciones de Cl-a las cuales fluctuaron de $0.6 \mu\text{g L}^{-1}$ a $1.65 \mu\text{g L}^{-1}$. En cuanto a la disponibilidad del sílice como nutriente, en el epilimnion se observó una distribución homogénea de concentraciones bajas de SiSR, con un promedio de $2.6 \mu\text{mol L}^{-1}$, de magnitud similar al de las aguas superficiales (0 m-25 m) durante la circulación ($1.6 \mu\text{mol L}^{-1}$). Al igual que en la estratificación bien establecida, las concentraciones más altas de Cl-a ($2.9 \mu\text{g L}^{-1}$) y SiBP ($109.7 \mu\text{mol L}^{-1}$) se presentaron formando un máximo en el metalimnion, franja que durante este periodo se observó más angosta y profunda.

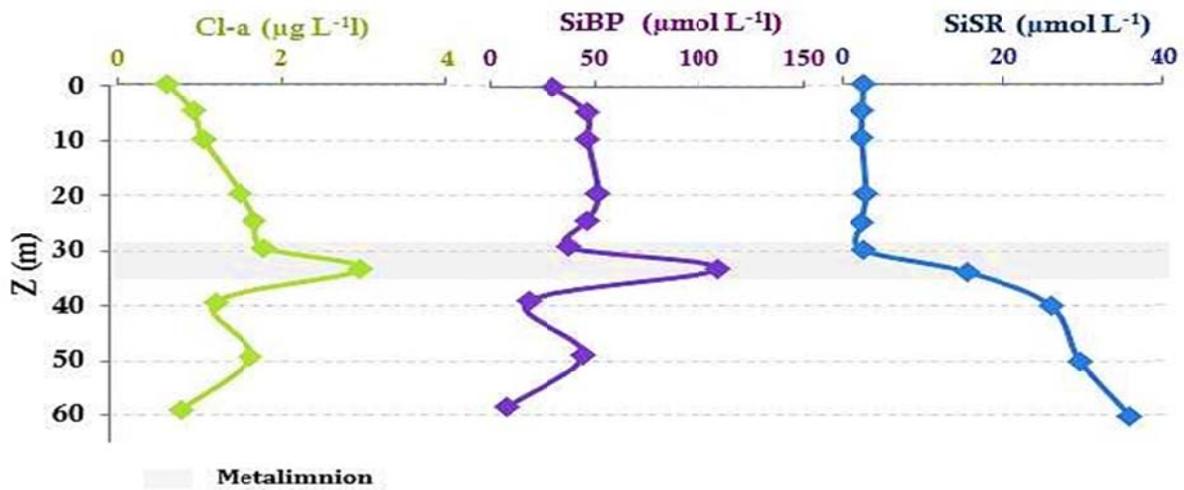


Figura 19. Perfiles de clorofila (Cl-a), sílice biogénico particulado (SiBP) y sílice soluble reactivo (SiSR) del lago Alchichica durante el periodo de estratificación tardía del año 2008.

En la Figura 19 se observa la formación del DCM en la base del metalimnion (34 m), además de una lectura de 15.5 $\mu\text{g L}^{-1}$ de SiSR. De esta forma, a los 30m la concentración de SiSR es de 2.5 $\mu\text{g L}^{-1}$, lo cual habla de un fuerte gradiente de este nutriente y por lo tanto de una activa producción primaria que agota las concentraciones de SiSR antes de que suban al epilimnion por turbulencias anteriormente mencionadas en la estratificación bien establecida. Por lo tanto, estas mezclas irregulares, liberan frústulos y células atrapadas en el metalimnion hacia la zona de mezcla, presentando las concentraciones de material particulado en el epilimnion arriba mencionadas. Cabe señalar que, durante este periodo, las concentraciones de SiBP en el metalimnion están dentro del orden de magnitud de las encontradas en el fondo del lago durante la circulación (122.6 $\mu\text{g L}^{-1}$).

En la franja anóxica del hipolimnion la creciente concentración de SiSR va de 26 $\mu\text{mol L}^{-1}$ a 35.7 $\mu\text{mol L}^{-1}$, nutriente que es liberado durante la circulación, debido al hundimiento de agua del epilimnion y la elevación del agua del hipolimnion, produciendo un nuevo florecimiento de diatomeas.

7.4.3 Distribución de Sílice Litogénico Particulado (SiLP)

7.4.3.1 Circulación, Estratificación Bien Establecida y Estratificación Tardía

Las distribuciones de sílice litogénico particulado durante los meses de estudio mostraron un comportamiento uniforme a lo largo de la columna de agua (Figura 20), presentando variaciones mínimas entre una profundidad y otra, situación que contrasta completamente con las de sílice biogénico particulado. De igual forma, los valores promedio entre cada uno de los meses se mantuvieron cercanos, obteniendo para el mes de febrero una concentración media de $17.5 \pm 7.4 \mu\text{g L}^{-1}$, en septiembre de $20 \pm 9.5 \mu\text{g L}^{-1}$ y noviembre de $26.2 \pm 8.7 \mu\text{g L}^{-1}$. Este comportamiento hace referencia a la forma continua en que entra el material alóctono al cuerpo de agua en distintas épocas del año y cómo estos polvos van sedimentando de manera pasiva por la columna de agua sin ser afectados de manera importante por las diferentes densidades en cada una de las franjas formadas durante la estratificación.

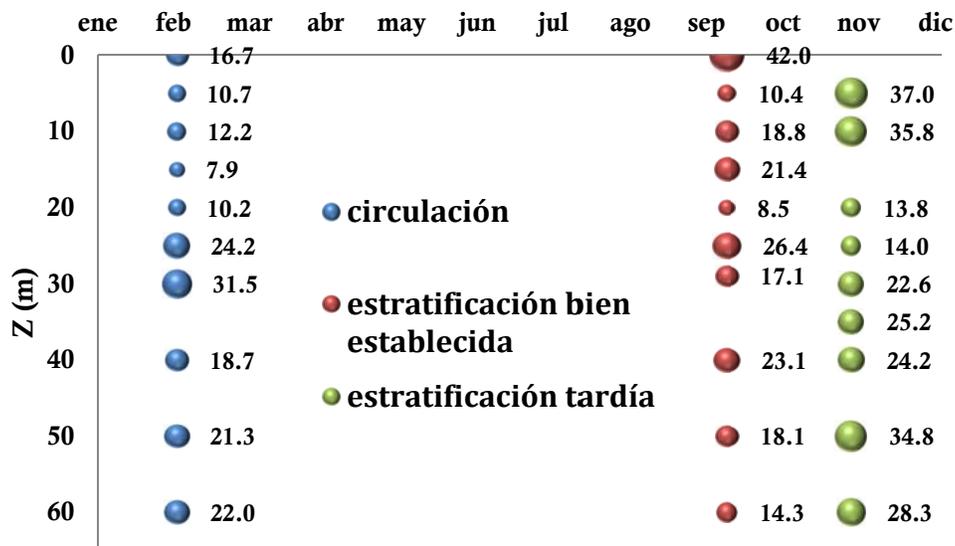


Figura 20. Distribución de sílice litogénico particulado (SiLP) en $\mu\text{mol L}^{-1}$ a lo largo de la columna de agua del lago Alchichica durante el año 2008

7.5 Flujos Verticales Estimados en Trampas de Sedimentos

7.5.1 Flujos de Sílice Biogénico Particulado

Generalmente, los productores primarios presentan una densidad mayor que la del agua, lo que provoca su hundimiento (Brönmark y Hansson, 2005). Por ello, la sedimentación es como un proceso clave en los ciclos de los nutrientes en los sistemas acuáticos, ya que este fenómeno físico constituye un importante mecanismo de exportación y pérdida de nutrientes hacia los sedimentos.

Los flujos de sílice biogénico particulado determinados durante la época de circulación del lago Alchichica fueron los más elevados, fluctuando entre los $1.37 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ y $1.62 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, con un valor promedio en la columna de agua de $1.50 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ (Figura 21). Al mismo tiempo, la figura muestra que los flujos en esta época fueron muy similares en las trampas de superficie, columna y fondo, indicando así una sedimentación homogénea y casi total hacia el fondo del lago. De acuerdo con Ardiles *et al.* (2012), estos flujos se deben principalmente a *Cyclotella alchichicana*, organismos de gran tamaño que presentan una alta tasa de sedimentación, estimada en 4 m d^{-1} , recorriendo toda la columna de agua en aproximadamente 15 días (Alcocer *et al.*, 2008), tiempo en el que no resultan afectadas de manera significativa por procesos como el de la depredación por parte del zooplancton, ya que esta especie no logra ser consumida debido a su tamaño, favoreciendo así su llegada a los sedimentos casi en su totalidad.

En contraste, durante la estratificación bien establecida la trampa de superficie ($0.20 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) presentó una concentración menor a las de columna ($0.37 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) y fondo ($0.50 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), lo cual indica que la formación de nuevas diatomeas se da principalmente en el metalimnion (DCM), a partir de donde hay una sedimentación de magnitud mayor hacia la capa profunda y el fondo del lago. Aun así, durante este periodo se presentaron los valores más bajos de los flujos de sílice biogénico (en promedio solamente $0.36 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, apenas la quinta parte del flujo medio de la circulación) aparentemente como consecuencia de las restricciones que implica la estratificación del lago, que puede

tanto reducir la tasa de sedimentación como disminuir el crecimiento poblacional de diatomeas a través de la limitación de nutrientes que se genera en el epilimnion.

En la estratificación tardía, las trampas de sedimentos colectaron material particulado de mayores magnitudes (Figura 21), que representan flujos de partículas entre los $0.52 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ y $0.76 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, con una media de $0.66 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ en el tirante de agua para esta época, poco más del doble que en la estratificación bien establecida. La máxima aportación de material particulado se observó en este periodo en la trampa colocada por debajo del metalimnion, a los 40 m de profundidad, seguida por la trampa de superficie ($0.70 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) y finalizando con el valor menor en el fondo del lago. Este ligero incremento de los flujos de sedimentación durante la estratificación tardía puede deberse al comienzo del florecimiento invernal de diatomeas, como lo respalda el incremento de la concentración de SiBP en esta época (Figura 15), el cual podría deberse al aumento en la disponibilidad de nutrientes en las aguas superficiales al profundizarse y debilitarse el metalimnion (Figura 13). Al mismo tiempo, dicho debilitamiento favorecería el hundimiento de las diatomeas al reducirse el gradiente de densidad, como lo respalda el desplazamiento vertical del máximo de clorofilas que se observa en la Figura 14c.

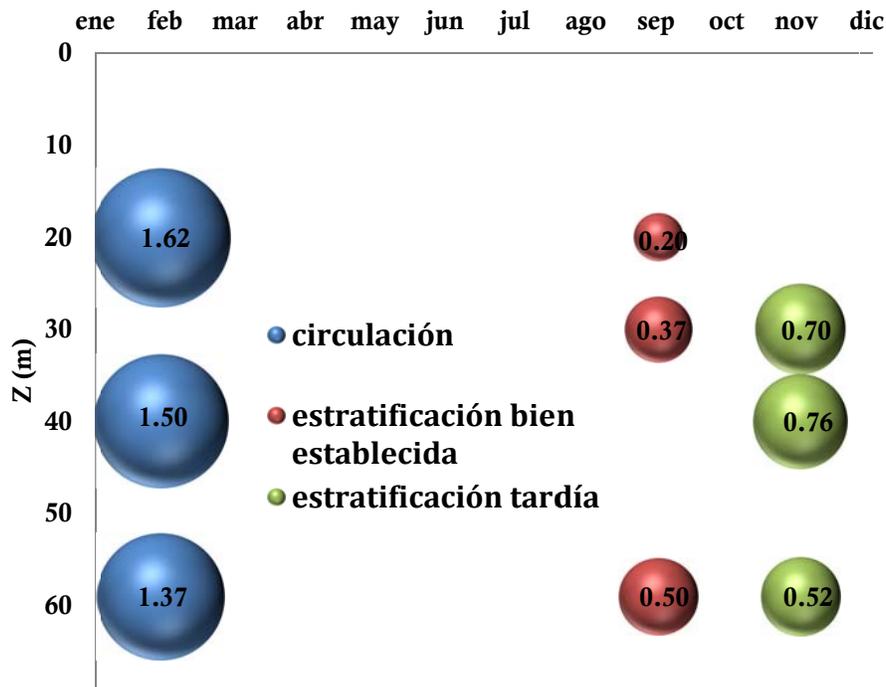


Figura 21. Flujos ($\text{g m}^{-2} \text{día}^{-1}$) de sílice biogénico particulado (SiBP) colectado en las trampas de sedimentos de superficie, columna y fondo del lago Alchichica durante el año 2008.

7.5.2 Flujos de Sílice Litogénico Particulado

En el periodo de circulación se registraron los flujos de SiLP más elevados, que fluctuaron entre los $0.47 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ y los $0.72 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, con un flujo promedio en la columna de agua de $0.63 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, indicando la ocurrencia de un mayor aporte de material alóctono al lago en esta época.

De acuerdo con Oseguera (2011), en este periodo de tiempo, que se presenta durante la estación fría y seca del año, los fuertes vientos provenientes del oeste, suroeste y del oeste que soplan a través del lago playa Totolcingo y de tierras de cultivo descubiertas, favorecen el aporte de material alóctono al lago. Estos vientos constantes probablemente hayan

aportado de manera uniforme sílice litogénico a la parte central del lago Alchichica, lugar en donde fueron colocadas las trampas de sedimento (superficie, columna y fondo) en la columna de agua.

En contraste, durante el periodo en que el lago se mantiene estratificado, el cambio de procedencia de los vientos predominantes (noreste, nor-noreste) asociado con la temporada de siembra, en donde los campos se encuentran cubiertos por cultivos, aparentemente generaría un menor aporte de polvos al lago (Oseguera, 2011). Los resultados aquí obtenidos fueron consistentes con esta posibilidad, pues se presentaron flujos heterogéneos y menos intensos (media de $0.27 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) durante la estratificación bien establecida (Figura 22) en comparación con los obtenidos durante la circulación. Los flujos durante la estratificación bien establecida fueron además más variables: oscilaron entre los $0.02 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ y los $0.44 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, con un coeficiente de variación del 80 %, lo cual habla de una elevada dispersión entre los flujos.

De manera similar, pero menos contrastante, los flujos durante la estratificación tardía también fueron menores (media de $0.37 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) y variables, dado que oscilaron entre los $0.20 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ y los $0.57 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. La magnitud mínima se observó en la trampa de fondo y el máximo en la trampa colocada por debajo del metalimnion. Este patrón aporta cierta evidencia sobre la probable retención diferenciada de las partículas litogénicas de sílice en la capa de mayor cambio de la densidad del agua, que solamente podría verificarse plenamente con una distribución de trampas mucho más amplia a lo largo de toda la columna de agua.

En general, el aporte de sílice litogénico hacia el lago no muestra una importancia cuantitativa equivalente a la de sílice biogénico; sin embargo, los flujos revelan que su contribución no es despreciable en comparación con los flujos de material litogénico de otros lagos, como por ejemplo el lago Malawi, en África, donde se han reportado en el rango de $< 0.001 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ a $0.31 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ (Pilskaln, 2004).

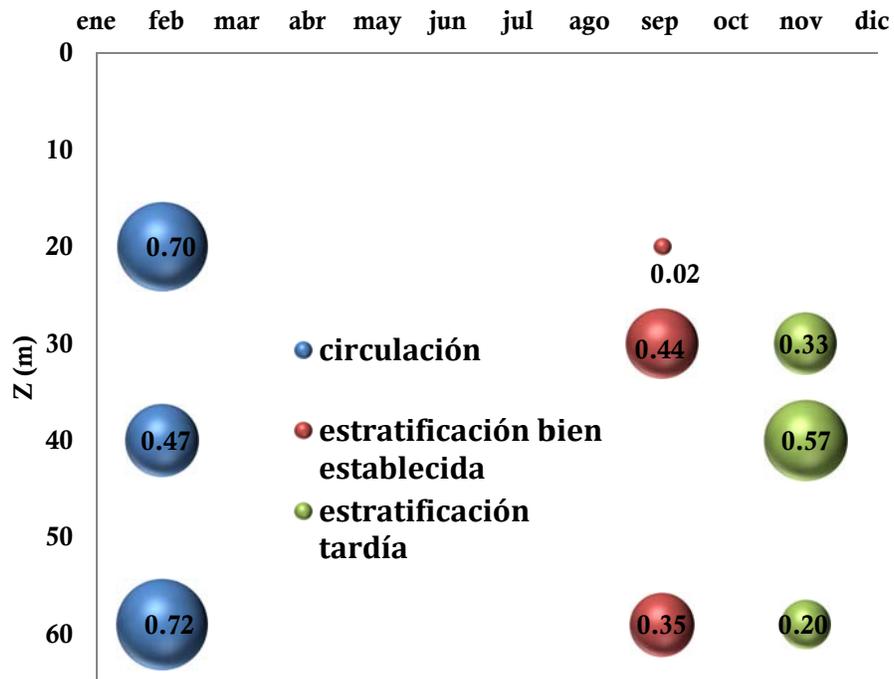


Figura 22. Flujos de sílice litogénico particulado (SiLP) en $\text{g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, colectado en las trampas de sedimentos de superficie, columna y fondo del lago Alchichica.

8. Conclusiones

En la presente investigación se analizaron muestras provenientes de la columna de agua del lago Alchichica, utilizando la técnica de doble digestión alcalina, comúnmente usada en aguas costeras, con la finalidad de conocer las concentraciones y distribución de sílice biogénico y litogénico particulado, en condiciones limnológicas contrastantes durante el año 2008.

Con base en el análisis de la información generada, se concluye lo siguiente:

1. Los resultados obtenidos durante la realización del presente trabajo demuestran la aplicabilidad de la técnica de doble digestión alcalina de Ragueneau *et al.*, (2005) en aguas epicontinentales, en particular en el lago Alchichica.
2. El método aplicado arrojó resultados coherentes tanto para los materiales de referencia utilizados como para las muestra naturales del lago Alchichica estudiadas. El error del método se estimó en $3.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ para el sílice biogénico y de $3.4 \mu\text{mol L}^{-1}$ para el sílice litogénico, así como un coeficiente de variación $< 8\%$. Las pruebas realizadas también indicaron la importancia de realizar la corrección al sílice biogénico aparente, dependiendo de la naturaleza de los materiales litogénicos contenidos en la muestra.
3. Los resultados de este trabajo respaldan la hipótesis planteada de que el contenido de sílice biogénico particulado en la columna de agua del lago Alchichica es significativamente ($t(29) = 4.06$, $p < 0.001$) mayor que el de sílice litogénico particulado. En particular, durante el período estudiado, la concentración de sílice biogénico particulado en Alchichica fue, en promedio, de $41.5 \mu\text{mol L}^{-1}$, aproximadamente el doble de la concentración promedio registrada para el sílice litogénico particulado, que fue de $21.1 \mu\text{mol L}^{-1}$ en el mismo período.
4. Los resultados obtenidos también respaldan que esta diferencia se debe en gran medida a la importancia de las diatomeas en este lago, pues la diferencia entre

ambos tipos de sílice particulado fue máxima durante el período de circulación, cuando las diatomeas florecen intensamente. En esta época la concentración promedio de sílice biogénico particulado alcanzó los $54.3 \mu\text{mol L}^{-1}$, en tanto la del sílice litogénico particulado fue de solamente $17.5 \mu\text{mol L}^{-1}$.

5. La variación en la distribución vertical y temporal de sílice biogénico particulado es similar a la de clorofila-a, mostrando ambos parámetros rasgos coincidentes y característicos del Lago Alchichica, específicamente el florecimiento invernal durante la circulación y el máximo profundo de clorofila (y ahora de sílice biogénico particulado) durante la estratificación, particularmente en su etapa tardía. En particular, durante la circulación del lago Alchichica se encontró una estrecha relación, no lineal, entre las concentraciones de sílice biogénico particulado y las de clorofila-a.
6. La concentración del sílice biogénico particulado en la columna de agua del Lago Alchichica presentó una alta variabilidad, oscilando en el rango de $3.7 \mu\text{mol L}^{-1}$ a $123 \mu\text{mol L}^{-1}$ y con una desviación estándar global de $28.5 \mu\text{mol L}^{-1}$. Estas variaciones en la distribución del sílice biogénico particulado mostraron una clara relación con la dinámica del lago, en particular con sus condiciones limnológicas más contrastantes, la estratificación y la circulación.
7. En contraste, la concentración del sílice litogénico particulado en la columna de agua del Lago Alchichica presentó una variabilidad mucho más baja, con un rango de solamente $7.9\text{--}42 \mu\text{mol L}^{-1}$ y una desviación estándar global tres veces más pequeña que la del biogénico, de solamente $9.0 \mu\text{mol L}^{-1}$. En concordancia, la distribución vertical del sílice litogénico no mostró casi relación con la dinámica anual del lago, ya que su distribución en la columna de agua fue casi constante durante condiciones limnológicas diferentes (circulación/estratificación).
8. Sin embargo, dentro de la población de valores de sílice litogénico particulado obtenidos, se identificó un valor considerablemente más elevado, de $355 \mu\text{mol L}^{-1}$. Si bien este valor fue estadísticamente aberrante, y por tanto no fue considerado en el

análisis de los patrones de sílice litogénico, no se encontró evidencia de que se debiese a errores analíticos, por lo que indica la posibilidad de eventos esporádicos pero muy intensos de depositación de sílice litogénico en Alchichica, cuya verificación requeriría de una frecuencia de muestreo mucho mayor a la utilizada aquí.

9. Los flujos verticales de sílice biogénico particulado observados en Alchichica durante el período estudiado también fueron significativamente ($t(8) = 3.30, p < 0.01$) más elevados, del orden del doble (promedio de $837 \text{ mg m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), que los flujos verticales de sílice litogénico particulado (promedio de $422 \text{ mg m}^{-2} \text{ día}^{-1}$).
10. La variabilidad de los flujos verticales de sílice biogénico también fue mayor que la de los del litogénico, debido particularmente a las variaciones entre las condiciones limnológicas contrastantes de circulación y estratificación. Los valores máximos del flujo vertical de sílice biogénico se observaron durante la circulación, cuando alcanzaron un promedio de $1498 \text{ mg m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), respaldando la importancia del flujo de sílice particulado biogénico hacia los sedimentos del lago Alchichica asociado al florecimiento de las diatomeas.
11. Los patrones de la distribución vertical y temporal del sílice reactivo soluble mostraron relación con los del sílice biogénico particulado, específicamente en el hipolimnion durante la circulación, respaldando la hipótesis de que en Alchichica la disponibilidad de sílice disuelto en el lago depende en gran medida del reciclado de las valvas de las diatomeas.

9. Literatura citada

- Adame, F.; J. Alcocer y E. Escobar. 2008. Size-fractionated phytoplankton biomass and its implications for the dynamics of an oligotrophic tropical lake. *Freshwater Biology* 53: 22-31.
- Alcocer, J. y A. Filonov. 2007. A note on the effects of an individual large rainfall event on saline Lake Alchichica, México. *Environmental Geology* 53: 777-783.
- Alcocer, J.; A. Lugo; E. Escobar; R. Sánchez y G. Vilaclara. 2000. Water column stratification and its implications in the tropical warm monomictic lake Alchichica, Puebla, México. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie* 27: 3166-3169.
- Alcocer, J.; E. Escobar y L. Oseguera. 2008. Acoplamiento pelágico-bentónico: respuesta de la zona bentónica profunda a la sedimentación del florecimiento invernal de diatomeas en el lago oligotrófico Alchichica, Puebla, México. *Hidrobiológica* 18: 115-122.
- Alcocer, J.; O. Escolero y L. Marin. 2004. Problemática del agua de la cuenca Oriental, estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala. *El agua en México vista desde la academia*. Academia Mexicana de Ciencias. México. 403 p.
- Alexander, J. y B. Douglas. 1987. *Conceptos y modelos de química inorgánica*. Reverte, S.A. España. 757 p.
- Ardiles, V. 2011. Dinámica a largo plazo de la biomasa fitoplanctónica en un lago monomítico cálido tropical. Tesis de Doctorado. Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología. UNAM. México. 148 p.

- Ardiles, V.; J. Alcocer; G. Vilaclara; L. Oseguera y L. Velasco. 2012. Diatom fluxes in a tropical, oligotrophic lake dominated by large-sized phytoplankton. *Hidrobiologia* 679: 77-90.
- Armienta, M.; G. Vilaclara; S. de la Cruz; S. Ramos; N. Cenicerros; O. Cruz; A. Aguayo y F. Arceaga. 2008. Water Chemistry of lake related to active and inactive Mexican volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178(2), 249-258.
- Besoain, E. 1985. Mineralogía de arcillas de suelos. IICA/CATIE. Costa Rica. 1205 p.
- Brönmark C. y L. Hansson. 2005. *The biology of lakes and ponds*. Oxford University Press. 285 p.
- Brzezinski M. y D. Nelson. 1989. Seasonal Change in the silicon cycle within a Gulf Stream warm-core ring. *Deep Sea Research* 36: 1009-1030.
- Calvo, B.; A. Gajardo y M. Maya. 2000. Rocas y minerales industriales de Iberoamérica. GME. España. 436 p.
- Canfield, D.; E. Kristensen y B. Thamdrup. 2005. *Aquatic Geomicrobiology*. Elsevier Academic Press. 640 p.
- Cobean, R. 2003. A world of obsidian: The mining and trade of a volcanic glass in ancient Mexico. *Arqueología Mexicana* 4: 298 p.
- Cuna, P.E. 1997. Estudio comparado de las metodologías para el análisis de las diatomitas aplicadas a una fracción del paleolago Tlaxcala (mina El Lucero, Tlaxcala). Tesis de Licenciatura. Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala, UNAM. 66 p.
- Filonov, A. y J. Alcocer. 2002. Internal waves in a tropical crater lake: Alchichica, Central México. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie* 28: 1857-1860.

- Filonov, A.; I. Tereshchenko y J. Alcocer. 2006. Dynamic response to mountain breeze circulation in Alchichica, a crater lake in Mexico. *Geophysical Research Letters* 33(7).
- Grasshoff, K., Kremling, K., & Ehrhardt, M. (1983). *Methods of seawater analysis*. Weinheim: Chemie.
- Huisman, J., Sharples, J., Stroom, J. M., Visser, P. M., Kardinaal, W. E. A., Verspagen, J. M. H., et al. (2004). Changes in turbulent mixing shift competition for light between phytoplankton species. *Ecology*, 85(11), 2960–2970.
- Hutchinson, E. 1975. *A treatise on Limnology*. John Wiley and Sons. 660 p.
- Icenhower, J. and P. Dove. 2000. The dissolution kinetics of amorphous silica into sodium chloride solutions: Effects of temperature and ionic strength. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64 (24): 4193-4203.
- Iriondo, M. 2007. *Introducción a la Geología*. Brujas. 240 p.
- Kazmierczak, J.; S. Kempe; B. Kremer; P. Lopez-Garcia; D. Moreira y R. Tavera. 2011. Hydrochemistry and microbialites of the alkaline crater lake Alchichica, Mexico. *Facies* 57: 543-570.
- Kirkwood, D. S. (1994). *Sanplus segmented flow analyzer and its applications*. Seawater analysis. Amsterdam, Skalar.
- Klein, C. y C. Hurlbut. 1996. *Manual de Mineralogía*. Reverte. Barcelona. 392 p.
- Koroleff, F.; K. Palmork; O. Ulltang y J. Gieskes. 1977. The international intercalibration exercise for nutrient methods. ICES Cooperative Research Report No. 67.44 p. En: *The Sanplus segmented flow analyzer*. Seawater analysis.

- Krausse, G.; C. Schelske y C. Davis. 1983. Comparison of three wet-alkaline methods of digestion of biogenic silica in water. *Freshwater Biology* 13: 73-81.
- Lewis, W. 1990. Comparisons of phytoplankton biomass in temperate and tropical lakes. *Limnology and Oceanography* 35(8): 1838-1845.
- Libes, S. 2009. *Introduction to Marine Biogeochemistry*. Academic Press. USA. 910 p
- Macek, M.; J. Alcocer; A. Lugo; M.E. Martínez; L. Peralta y G. Vilaclara. 2009. Long term picoplankton dynamics in a warm-monomictic, tropical high altitude lake. *Journal of Limnology*. 68 (2): 183-192.
- Margalef, R. 1974. *Ecología*. Omega. Barcelona. 951 p.
- Margalef, R. 1983. *Limnología*. Omega. Barcelona. 1010 p.
- Marin, R. 2003. *Fisicoquímica y microbiología de los medios acuáticos: Tratamiento y control de calidad de aguas*. Ediciones Diaz de Santos, 336 p.
- Oliva, M.; G. Garduño; G. Vilaclara; M. Ortega; M. Garcia y A. Pliego. 2008. *Diatomeas, Bacillariophyceae*. UNAM, Mexico. 110 p.
- Oliva, MG.; A. Lugo; J. Alcocer; L. Peralta y M. Sanchez. 2001. Phytoplankton dynamics in a deep, tropical, hyposaline lake. *Hydrobiologia* 466: 299-306.
- Oseguera L. 2011. *Variación temporal y espacial del flujo de materia total particulada en un lago monomíctico cálido*. Tesis de Doctorado. Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología. UNAM, México. 110 p.
- Oseguera, L.; J. Alcocer y G. Vilaclara. 2011. Relative importance of dust inputs and aquatic biological production as sources of lake sediments in an oligotrophic lake in a semi-arid area. *Earth Surface Process and Landforms*. 36(3), 419-426.

- Punning, J.; T. Jaanus; T. Koff y T. Alliksaar. 2003. Seasonal fluxes of particulate matter in a small closed lake in northern Estonia. *Water, Air and Soil Pollution* 149 (1-4), 77-92.
- Ragueneau, O. y P. Tréguer. 1994. Determination of biogenic silica in coastal waters: applicability and limits of the alkaline digestion method. *Marine Chemistry* 45: 43-51.
- Ragueneau, O.; N. Savoye ; Y. del Amo; J. Cotton ; B. Tardiveau y A. Leynaert. 2005. A new method for the measurement of biogenic silica in suspended matter of coastal waters: using Si:Al ratios to correct for the mineral interference. *Continental Shelf Research* 25: 697-710.
- Savostin, P. 1972. Microbial transformation of silicates. *Z. Pflanzenernahrung Bodenkunde* 132: 37-45.
- Sicko-Goad, L.; C. Schelske y E. Stoermer. 1984. Estimation of intracellular carbon and silica content of diatoms from natural assemblages using morphometric techniques. *Limnology and Oceanography* 29 (6): 1170-1178.
- Sjöberg, S. 1996. Silica in aqueous environments. *Journal of Non-Crystalline Solids* 196: 51-57.
- Stumm, W. y M. James. 1996. *Aquatic Chemistry*. Wiley-Interscience Publication. 1022 p.
- Vilaclara, G.; M. Chavez; A. Lugo; H. Gonzalez y M. Gaytan. 1993. Comparative description of crater-lakes basic chemistry in Puebla State, Mexico. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie* 25: 435-440.
- Walter, J. 1996. Relation between rates of aluminosilicate mineral dissolution, pH, temperature, and surface charge. *American Journal of Science* 296: 693-728.
- Wetzel, R. 1981. *Limnología*. Ediciones Omega, Barcelona, 679 p.