

2.2. Dinámica de la materia orgánica disuelta cromofórica (CDOM) en dos lagos tropicales de alta montaña en el centro de México

Soria-Reinoso Ismael¹; Alcocer Javier^{2,*}; Oseguera Luis A.³; Rivera-Herrera E. Montserrat¹; Vargas-Sánchez Mariana¹ e Ibarra-Morales Diana¹

¹ Programa de Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México. Av. Universidad 3000, Delegación Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México.

² Grupo de Investigación en Limnología Tropical, FES Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México. Av. de los Barrios 1, Los Reyes Iztacala, C.P. 54090, Tlalnepantla, Estado de México.

*Autor para correspondencia: jalcocer@unam.mx

Resumen

El Sol y La Luna son los únicos lagos tropicales de alta montaña perennes en México. Están sujetos a condiciones extremas (pH ácido, alta radiación UV) y son considerados centinelas del cambio global. Esta investigación evaluó la variación anual de la concentración y calidad de la materia orgánica disuelta cromofórica (CDOM) en El Sol y La Luna. Se tomaron muestras mensuales en la superficie y fondo de cada lago para caracterizar las propiedades ópticas de la CDOM. Se midieron las variables ambientales asociadas, diferenciando la temporada fría-seca y cálida-lluviosa. La concentración de CDOM, definida como el coeficiente de absorción a_{350} , fue mayor en El Sol ($1.07 \pm 0.34 \text{ m}^{-1}$) que en La Luna ($0.40 \pm 0.27 \text{ m}^{-1}$). Los aportes autóctonos de CDOM en El Sol fueron más importantes durante la temporada de lluvias ($S_R > 1$); mientras tanto, durante la estación seca, el depósito atmosférico promovió el ingreso de CDOM alóctono derivada de los suelos agrícolas de la base del volcán, lo que se refleja en compuestos de mayor peso molecular ($S_R \sim 1$). La CDOM de La Luna es fundamentalmente alóctona del depósito atmosférico y de su cuenca de drenaje. Se caracteriza por compuestos de mayor peso molecular que son rápidamente fotodegradados por las condiciones de alta sensibilidad a la radiación solar de La Luna.

Palabras clave: *Absorción CDOM; lagos alpinos; Nevado de Toluca; depósito atmosférico; pendiente espectral.*

Abstract

El Sol and La Luna are Mexico's only high-mountain tropical perennial lakes. These lakes are exposed to extreme conditions (acid pH, high UV radiation) and are considered sentinels of global change. This study evaluated the annual variation of the concentration and quality of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in El Sol and La Luna. Monthly samples were taken on the surface and bottom of each lake to characterize the CDOM optical properties. The associated environmental variables were measured, differentiating cold-dry and warm-rainy seasons. The CDOM concentration, defined as the absorption coefficient a_{350} , was higher in El Sol ($1.07 \pm 0.34 \text{ m}^{-1}$) than in La Luna ($0.40 \pm 0.27 \text{ m}^{-1}$). The autochthonous contributions of CDOM in El Sol were more important during the rainy season ($S_R > 1$); meanwhile, during the dry season, atmospheric deposition promoted the allochthonous entry of CDOM derived from agricultural soils at the base of the volcano, which is reflected in compounds of higher molecular weight ($S_R \sim 1$). In La Luna, the CDOM is fundamentally allochthonous, derived from the atmospheric deposition and its drainage basin. It is characterized by compounds of higher molecular weight that are rapidly photodegraded due to La Luna's high sensitivity to solar radiation.

Keywords: *CDOM absorption; alpine lakes; Nevado de Toluca; atmospheric deposition; spectral slope.*

Introducción

La materia orgánica disuelta (DOM) de los sistemas acuáticos epicontinentales desempeña un papel fundamental en el ciclo global del carbono (C) (Battin *et al.*, 2009). La DOM cromofórica (CDOM), una mezcla compleja (aminoácidos aromáticos, fenoles de lignina y sustancias húmicas) de origen autóctono o alóctono, representa la fracción de DOM coloreada que absorbe la luz (Li y Hur 2017, Zhang *et al.*, 2021). La CDOM en los sistemas acuáticos epicontinentales regula la penetración de luz en la columna de agua y por ende la producción primaria y la estructura térmica (Zhang *et al.*, 2021). Además, la mineralización de la DOM, ya sea por procesos biológicos y fotoquímicos, determina el metabolismo acuático e influye directamente en las emisiones de CO₂ y CH₄ hacia la atmósfera (Sobek *et al.*, 2007, Tranvik *et al.*, 2009).

La espectroscopía UV-Vis se ha utilizado ampliamente para caracterizar la abundancia y calidad de la CDOM (Li y Hur 2017). Los coeficientes de absorción (a_{CDOM}) de longitudes de onda específicos proporcionan datos como el estado trófico (a_{254}), la atenuación difusa de radiación UV (a_{320}), el contenido de lignina y la relevancia en los ciclos biogeoquímicos (a_{350}) o en teledetección (a_{440}) (Li y Hur 2017, Zhang *et al.*, 2021). Además, los a_{CDOM} presentan correlaciones positivas con el C orgánico disuelto (DOC) por lo que son un *proxy* confiable para predecir o estimar el DOC (Massicotte *et al.*, 2017). Otras propiedades ópticas como el cociente del coeficiente de absorción de 250 nm a 365 nm (a_{250}/a_{365}), la pendiente espectral (S) entre 275-295 nm ($S_{275-295}$) y el coeficiente de pendiente espectral (S_R) son indicadores del peso molecular (PM) y origen de la CDOM (Helms *et al.*, 2008, Su *et al.*, 2015).

Los lagos de alta montaña (LAM) son ecosistemas únicos situados sobre la línea arbórea (> 4000 m snm) y considerados como centinelas del cambio climático (Adrian *et al.*, 2009). Se caracterizan por tener un bajo contenido de nutrientes, pH y DOC (Sommaruga 2001). Debido a la elevada incidencia de radiación solar (RUV), la concentración de DOM es baja, poco aromática (mayor contribución algal y bacteriana) y de bajo PM (Su *et al.*, 2015).

En México existen únicamente dos LAM perennes: El Sol y La Luna. Estudios previos han caracterizado su dinámica térmica, limnológica, y biológica (Alcocer *et al.*, 2004, 2020b, Ibarra-Morales *et al.*, 2022). Recientemente, se reportó la variación temporal del DOC en ambos lagos (Aucancela *et al.*, 2020). Las concentraciones de DOC en El Sol son hasta ocho veces más altas que en La Luna, con valores máximos a inicios de la temporada de lluvias. Sin embargo, hasta la fecha, no se ha caracterizado la abundancia y calidad de la CDOM a pesar de su importancia en los procesos biogeoquímicos y ecológicos como parámetros más sensibles a los cambios ambientales que las mediciones de DOC por sí solas (Mladenov *et al.*, 2011). Además, los lagos tropicales de alta montaña están menos estudiados que su contraparte templada. Por tal motivo, el objetivo del presente estudio es determinar los coeficientes de absorción y caracterizar la variación anual de la CDOM y sus impulsores ambientales en los únicos LAM en México: El Sol y La Luna, para establecer la línea base para futuras investigaciones.

Materiales y Métodos

Área de estudio

Este estudio se realizó en los lagos de alta montaña El Sol y La Luna, ubicados dentro del cráter del volcán Nevado de Toluca, Estado de México a 4200 m snm (Figura 1). La zona presenta un clima alpino frío, con temperaturas medias mensuales que fluctúan entre 2.3 ± 1.1 °C en enero a 5.3 ± 1.2 °C en mayo (período 1964-2019; estación 15062 Nevado Toluca; SMN-CONAGUA, 2023). Las precipitaciones por debajo del valor medio anual (98 mm) se presentan de octubre a abril (estación seca; mínimo en febrero, 11 mm), mientras que los valores de precipitación más altos ocurren de mayo a septiembre, con máximos de 236 mm en julio (período 1964-2019; estación 15062 Nevado Toluca; SMN-CONAGUA, 2023). El

área de captación (El Sol: 2.39 km²; La Luna: 0.74 km²) tiene una cubierta vegetal poco desarrollada y dominada por pastizales alpinos, musgos y líquenes (Ibarra-Morales *et al.*, 2022).

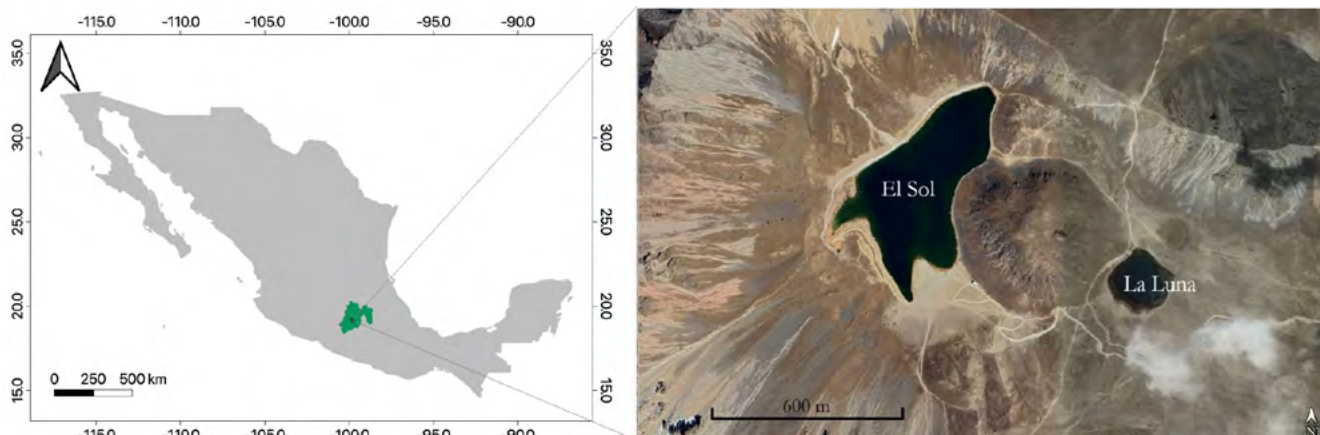


Figura 1. Lagos El Sol y La Luna dentro del cráter del volcán Nevado de Toluca, Estado de México. (Imagen: Google Earth-2023).

A pesar de tener el mismo origen, régimen hídrico y edad, ambos lagos tienen diferencias en sus características morfométricas, fisicoquímicas, biológicas y ecológicas (Armienta *et al.*, 2000, Alcocer *et al.*, 2004, Jiménez-Seinos *et al.*, 2023). El Sol (oligotrófico) es más grande (superficie: 22.9 ha vs. 3 ha), profundo (profundidad máxima: 15 m vs 10 m) y menos transparente (profundidad de disco de Zecchi: 5.4 m vs. 9.1 m) que La Luna. Además, tiene una extensa zona litoral con vegetación y se introdujo trucha arcoíris a diferencia de La Luna (ultra-oligotrófico), que no tiene peces y presenta una zona litoral reducida y desnuda. Ambos lagos, separados por un domo dacítico, son fríos (~8 °C), ácidos, poco mineralizados, bien oxigenados y polimícticos cálidos con niveles de agua que fluctúan entre la estación seca y lluviosa, sin secarse. No presentan una capa de hielo en ninguna época (Alcocer *et al.*, 2004).

Metodología

Se realizaron muestreos mensuales durante un año (febrero 2022 – marzo 2023) en la porción central y más profunda de cada lago. Se midieron los parámetros fisicoquímicos de la columna de agua [temperatura (T), oxígeno disuelto (OD), pH y conductividad eléctrica (K₂₅)] utilizando una sonda multiparamétrica Hydrolab DS5. Además, se obtuvieron los datos meteorológicos de precipitación para el año de estudio (EMA Nevado de Toluca; SMN-CONAGUA, 2023) y se calculó la precipitación y radiación solar acumulada de los 30 días previos a cada fecha de muestreo (Gerea *et al.*, 2017).

Para caracterizar la CDOM, se recolectaron por duplicado muestras de agua en la superficie (0.5 m) y fondo utilizando una botella de muestreo UWITEC de 5 L. Las muestras se filtraron sucesivamente, primero a través de filtros pre-combustionados Whatman GF/F (0.7 µm) y luego por filtros Millipore (0.22 µm). Las muestras se almacenaron en oscuridad y frío (4 °C) en frascos (prelavados con HCl) ámbar de borosilicato para evitar reacciones microbianas y de fotooxidación (Helms *et al.*, 2008).

Luego de climatizar las muestras a temperatura ambiente, se obtuvieron los espectros de absorbancia UV-Vis entre 200 nm y 800 nm, en intervalos de 1 nm, utilizando un espectrofotómetro de doble haz (Perkin Elmer, Lambda-35) con cubetas de cuarzo de 1 cm y agua ultrapura Milli-Q como blanco. Se restó la absorbancia media de 700 a 800 nm de todos los valores de absorbancia espectral para eliminar la línea base instrumental, la dispersión y efectos refractivos (Helms *et al.*, 2008). Los coeficientes de absorción neperianos a_{CDOM} (m⁻¹) se obtuvieron a partir de los datos de absorbancia corregidos (A) en función de la longitud de la cubeta (L; 0.01 m), según la ecuación 1.

$$a_{CDOM} = 2.303 * A/L \quad (1)$$

Las pendientes espectrales $S_{275-295}$ y $S_{350-400}$ se calcularon mediante una regresión lineal de los espectros de absorción del rango de longitud de onda transformados con el logaritmo natural y se expresaron como número positivo (nm^{-1}). El coeficiente de pendiente espectral S_R se calculó como $S_{275-295}$ dividido por $S_{350-400}$ (Helms *et al.*, 2008). Además, se calculó el cociente de los coeficientes de CDOM a 250 nm y 365 nm (a_{250}/a_{365}), utilizados como indicadores del PM de la CDOM. La concentración de clorofila-a (Clor-a) se midió por extracción en acetona y fluorometría (EPA 445.0, Arar y Collins, 1997).

Las diferencias temporales (lluvias vs. secas) entre ambos lagos se determinaron mediante un análisis factorial de varianza (lago x temporada). Se realizó la prueba de Shapiro-Wilk y el test de Levene para corroborar la normalidad y homocedasticidad de varianzas. Las variables que no cumplieron con estos supuestos fueron transformadas a escala logarítmica y estandarizados para tener una distribución de media de 0 y desviación estándar de 1. Se determinaron correlaciones no paramétricas (Spearman) con las variables fisicoquímicas, utilizando el programa SigmaPlot V14.0.

Resultados y Discusión

Caracterización ambiental

Se definieron dos periodos de acuerdo con la precipitación acumulada: el periodo “seco” de noviembre 2022 a marzo 2023 (incluido febrero-abril 2022) y el periodo “lluvioso” de mayo a octubre de 2022. Hubo diferencias significativas ($F=347$; $p<0.0001$) entre temporadas, con 130 mm (16 ± 21 mm) de precipitación en la estación seca y con 1118 mm (186 ± 71 mm) en la estación lluviosa. La precipitación máxima se registró en julio y la mínima en enero-marzo, con un total acumulado de 1249 mm.

La T y el OD no presentaron diferencias significativas entre lagos ($p>0.05$) pero sí entre temporadas ($F>6.3$; $p<0.05$). El pH y la K_{25} fueron mayores en El Sol con diferencias entre ambos periodos ($F>5.5$; $p<0.05$). La concentración de Clor-a fue significativamente mayor ($F=68.5$; $p<0.0001$) en El Sol que en La Luna, con valores más altos en la temporada cálida de lluvias ($F=8.9$; $p<0.05$), similar a lo reportado previamente (Alcocer *et al.*, 2004 y 2020b). Solamente el OD en El Sol presentó diferencias significativas entre la superficie y fondo ($F=9.8$; $p<0.05$), con valores más bajos ($\sim 2-3$ mg L^{-1}) en el fondo en julio, agosto y diciembre. Esto se debe a su régimen polimíctico cálido discontinuo a diferencia de La Luna que es polimíctico cálido continuo (Alcocer *et al.*, 2020b).

Cuadro 1. Caracterización fisicoquímica de los lagos El Sol y La Luna para el periodo anual (febrero 2022 – marzo 2023)

	El Sol					La Luna				
	T °C	OD mg L^{-1}	pH	K_{25} $\mu\text{S cm}^{-1}$	Clor-a $\mu\text{g L}^{-1}$	T °C	OD mg L^{-1}	pH	K_{25} $\mu\text{S cm}^{-1}$	Clor-a $\mu\text{g L}^{-1}$
Promedio	9.0	7.5	8.1	42	0.92	9.3	6.9	4.9	10	0.28
Desviación estándar	2.2	1.3	0.8	3	0.44	2.1	0.6	0.9	1	0.08
Mínimo	4.8	2.1	6.0	39	0.26	4.6	6	3.1	9	0.13
Máximo	13.0	9.2	9.0	47	1.72	13.0	8.2	7	12	0.47

T = temperatura, OD = oxígeno disuelto, K_{25} = conductividad eléctrica estandarizada a 25°C, Clor-a = Concentración de clorofila-a

Concentración de CDOM

Los coeficientes de absorción (a_{CDOM}) son un indicador de la cantidad relativa de CDOM. Teniendo en cuenta que a_{254} refleja principalmente compuestos aromáticos, y que en sistemas de aguas claras ultraoligotróficos, el a_{440} es cercano a 0 o incluso negativo, reportamos la concentración de CDOM como a_{350} , como lo sugieren Zhang *et al.* (2021). No se detectaron diferencias significativas ($p>0.05$) en las variables ópticas entre la superficie y fondo en ningún lago, por lo que se reportan los valores integrados.

El promedio anual de a_{350} registrado en El Sol ($1.07 \pm 0.34 \text{ m}^{-1}$) fue casi el triple que en La Luna ($0.40 \pm 0.27 \text{ m}^{-1}$), con diferencias entre ambos lagos y entre temporadas (interacción; $F=5.4$; $p<0.05$). Los valores más altos de a_{350} se registraron en julio para El Sol ($1.54 \pm 0.14 \text{ m}^{-1}$) y marzo (2022) para La Luna ($0.96 \pm 0.23 \text{ m}^{-1}$). Mientras tanto, el a_{350} mínimo de ambos lagos (El Sol= $0.53 \pm 0.11 \text{ m}^{-1}$; La Luna= $0.16 \pm 0.04 \text{ m}^{-1}$) se midió en abril (Figura 2a-b). Se observó una alta correlación entre los a_{CDOM} dentro de sus regiones del espectro de luz ultravioleta (a_{254} ; a_{320} ; a_{350} ; a_{365} $r^2=0.83-0.98$; $p<0.001$), por lo que presentaron un comportamiento temporal similar, con valores significativamente mayores en El Sol. Los rangos de a_{CDOM} de ambos lagos son consistentes con estudios anteriores de lagos alpinos (Mladenov *et al.*, 2011, Su *et al.*, 2015). El a_{350} se correlacionó ($p<0.05$) con el pH ($r=0.65$), la K_{25} ($r=0.61$) y la Clor-a ($r=0.51$).

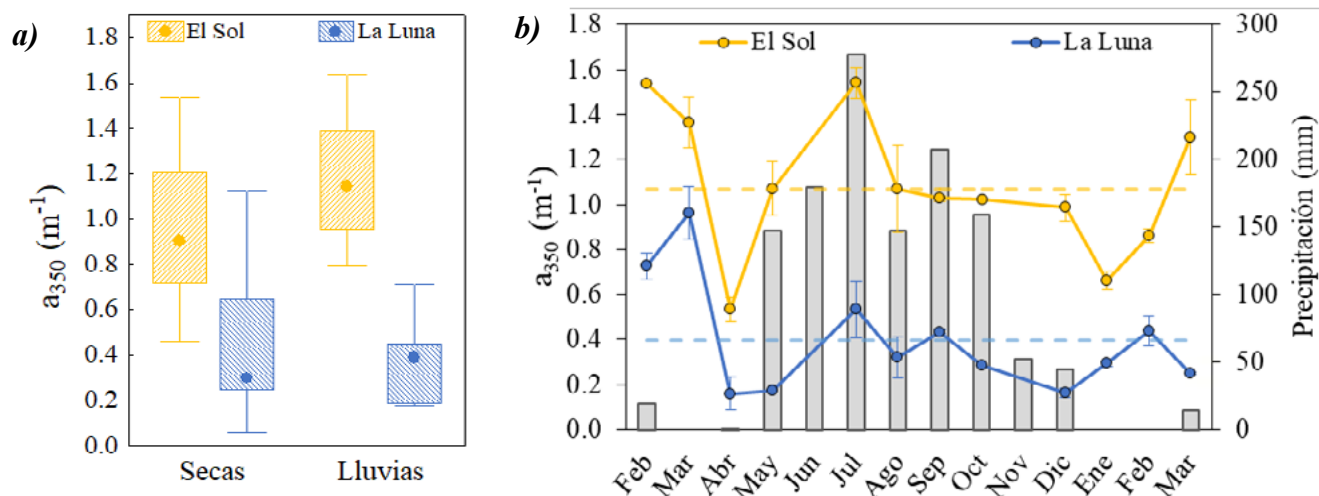


Figura 2. Diagramas de caja (a) y variación mensual (b) de la absorción promedio ($\pm$ d.e) de CDOM a 350 nm (a_{350}) de los lagos El Sol y La Luna. En (a) se indica la mediana (círculo relleno), los percentiles y el rango. En (b) las líneas discontinuas corresponden al promedio anual para El Sol (naranja) y La Luna (azul). La precipitación mensual acumulada se muestra en barras.

Considerando que el a_{350} es un indicador del DOC a escala local (Massicotte *et al.*, 2017), la concentración de CDOM más elevada en El Sol es similar al DOC reportado previamente por Aucancela *et al.* (2020), con valores mayores en El Sol debido a sus condiciones de oligotrofia, mayor impacto antrópico (introducción de trucha) y mayor área de captación que La Luna (ultraoligotrófico). Además, el coeficiente de atenuación de luz es mayor en El Sol, lo que refleja la mayor turbidez (Alcocer *et al.*, 2020a), pero también la mayor concentración de CDOM registrada en comparación con La Luna. Dadas las condiciones de pH más extremas en el lago La Luna, la densidad microbiana y de fitoplancton es menos abundante que en El Sol (Cuna *et al.*, 2022). Esto sugiere que la producción autóctona de CDOM es más baja en La Luna, según la correlación directa entre los a_{CDOM} y la abundancia bacteriana para lagos alpinos (Mladenov *et al.*, 2011). Cabe mencionar que La Luna es un ecosistema sensible a la RUV, por lo cual se esperarían mayores tasas de fotodegradación, en comparación con El Sol, que tiene una mayor atenuación UV en la zona superior de la columna de agua (Alcocer *et al.*, 2020a).

Se observó una variación sincrónica de a_{350} en ambos lagos (Figura 2b), probablemente debido a los efectos regionales (precipitación, radiación, temperatura y viento), como se ha descrito previamente para lagos de la Patagonia (Gerea *et al.*, 2017). Se ha demostrado que los aportes atmosféricos (depósito húmedo y seco) tienen mayores efectos sobre la CDOM de lagos alpinos que la escorrentía superficial y aportes de la vegetación terrestre poco desarrollada (Mladenov *et al.*, 2011).

El a_{350} de El Sol fue mayor en lluvias (Figura 2a), lo cual podría asociarse al efecto de la precipitación acumulada. Sin embargo, la alta correlación de a_{350} con la concentración de Clor-a, que presentó mayores valores en lluvias por el aporte de nutrientes (Alcocer *et al.*, 2004), sugiere que la CDOM de El Sol es mayoritariamente autóctona, por el aporte de fitoplancton, algas bentónicas y su posterior

descomposición. Se debe agregar que se presentaron picos altos de a_{350} en la temporada seca (febrero-marzo; Figura 2a), periodo de menor productividad limitado por las bajas temperaturas (Alcocer *et al.*, 2004). Ibarra-Morales *et al.* (2020) mencionan que los vientos dominantes durante la estación fría-seca soplan en dirección SO-NE y hay un transporte de compuestos orgánicos derivados de tierras agrícolas que rodean la base del volcán Nevado de Toluca. Además, se ha demostrado que durante los primeros eventos de precipitación en la época seca (como sucedió en febrero 2022 y marzo 2023), las concentraciones de CDOM del agua de lluvia son significativamente más altas por el “lavado” de sustancias acumuladas derivadas de la quema de residuos de cultivos y polvo antropogénico. Por el contrario, la CDOM del agua de lluvia recolectada en la temporada de mayor precipitación es menor por un efecto de dilución (Zhang *et al.*, 2014).

En La Luna no se diferencia un efecto temporal de a_{350} , pero sí valores más altos en febrero-marzo (Figura 2). Alcocer *et al.* (2020c) mencionan que el contenido de C orgánico de los suelos alrededor del lago La Luna es mayor que en El Sol. Lo anterior, sumado a que los vientos durante la estación seca soplan directamente sobre La Luna (Barba-López *et al.*, 2021), sugiere que los aportes alóctonos de CDOM, derivados del depósito seco y arrastre de sedimentos de su cuenca de drenaje, son más importantes en La Luna. Esto es similar a lo reportado recientemente, donde el aporte de C orgánico terrestre (es decir, pastizal y zacatonal alpino) representa una proporción mayor en La Luna que en El Sol (Alcocer *et al.*, 2020c, Jiménez-Seinos *et al.*, 2023).

La mayor incidencia de RUV en el Nevado de Toluca se ha registrado durante la temporada fría-seca (diciembre a abril), con valores más bajos en los meses cálidos y lluviosos (mayo-noviembre; Alcocer *et al.*, 2020b). En este estudio, la radiación solar media (30 días antes del muestreo) máxima se midió en abril ($\sim 302 \text{ W m}^{-1}$; SMN-CONAGUA, 2023), lo que aumentaría significativamente la fotodegradación de la CDOM, disminuyendo el a_{350} de ambos lagos (Figura 2b).

Fuentes y procesamiento de CDOM

La $S_{275-295}$ presentó diferencias significativas entre ambos lagos ($F=8.3$; $p<0.01$) independientemente de la temporada, con un promedio anual en El Sol de $0.024\pm 0.003 \text{ nm}^{-1}$ y en La Luna de $0.022\pm 0.007 \text{ nm}^{-1}$ (Figura 3a). La $S_{275-295}$ se correlacionó ($p<0.05$) de forma positiva con el PM definido como a_{250}/a_{365} ($r = 0.80$) y negativa con la precipitación ($r = -0.49$) y el coeficiente de pendiente espectral S_R ($r = -0.60$).

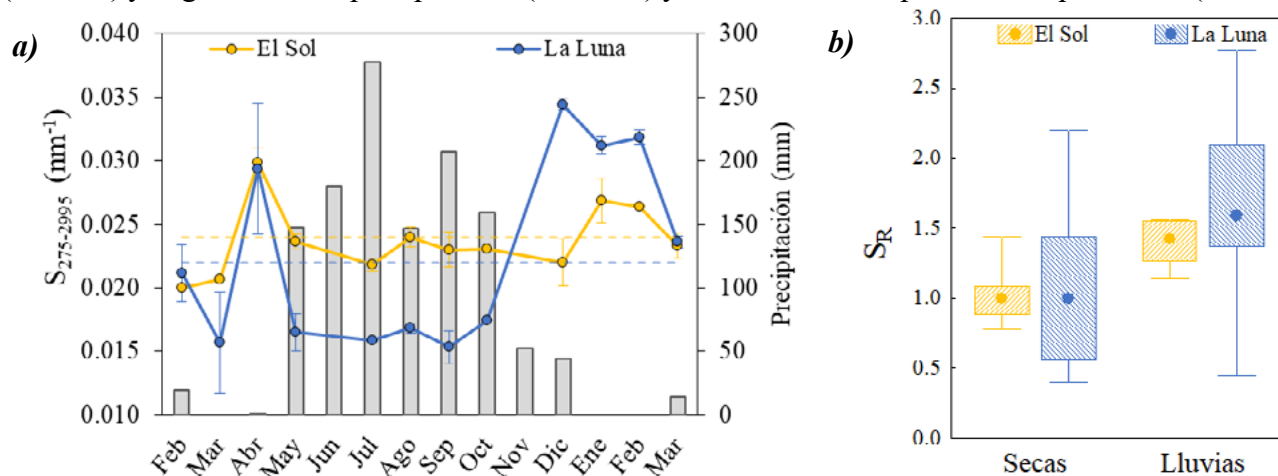


Figura 3. Variación mensual (a) de la pendiente espectral ($S_{275-295}$) y diagramas de caja (b) del coeficiente de pendiente espectral (S_R) de los lagos El Sol y La Luna. En (a) las líneas discontinuas corresponden al promedio anual para El Sol (naranja) y La Luna (azul) y la precipitación mensual acumulada (30 días previos al muestreo) se muestra en barras. En (b) se indica la mediana (círculo relleno), los percentiles y el rango de S_R .

Los valores de S_R fluctuaron entre 0.8 y 1.6 en El Sol (1.2 ± 0.3) y entre 0.44 y 2.5 en La Luna (1.3 ± 0.7). En ambos lagos, el S_R mínimo y máximo se registraron en enero y julio, respectivamente. No se observó

una diferencia significativa del S_R entre lagos, pero sí entre temporadas ($F=9.1$; $p<0.005$), con valores más altos en lluvias (Figura 3b). El S_R se correlacionó ($p<0.05$) con los a_{CDOM} ($r>0.33$), con la T del agua ($r=0.37$), la precipitación acumulada ($r=0.45$), el OD ($r=-0.38$) y con el PM ($r=-0.84$).

$S_{275-295}$ y S_R cambian en función de las fuentes y procesamiento de DOM. (Helms *et al.*, 2008). Los valores de $S_R>1$ son indicativos de un enriquecimiento de compuestos de bajo PM (menor humificación), derivados de fuentes autóctonas o de procesos de fotodegradación (rompimiento de enlaces y pérdida de DOM de alto PM). Mientras tanto, los valores de $S_R<1$ se atribuyen a un mayor contenido de compuestos de alto PM, de origen terrestre (Helms *et al.*, 2008).

La $S_{275-295}$ es independiente de la concentración de CDOM y está inversamente relacionada a su PM (Su *et al.*, 2015). La $S_{275-295}$ fue mayor en El Sol que La Luna. Por lo tanto, el tamaño molecular de CDOM más pequeño en El Sol se asocia a la acumulación y descomposición microbiana de la vegetación sumergida y fitoplancton, más abundantes que en La Luna. S_R se correlacionó positivamente con los a_{CDOM} , lo que indica mayor contribución de CDOM autóctona en El Sol en lluvias ($S_R>1$) y alóctona de alto PM proveniente del depósito atmosférico en secas (Figura 3b; $S_R\sim 1$). Los valores mayores de $S_{275-295}$ se calcularon para los meses secos (abril, diciembre-enero) de alta incidencia de RUV, lo que promueve la fotodegradación de CDOM en esta temporada y acumula compuestos de menor PM.

La $S_{275-295}$ permanece relativamente estable, excepto en los picos de máxima RUV (Figura 3a). Esto sugiere que el principal reservorio de CDOM en La Luna es de origen alóctono de alto PM (p.ej., DOM terrígena menos degradada y aromática), proveniente del depósito atmosférico y de su cuenca de drenaje. Sin embargo, el DOM alóctono es más susceptible al procesamiento fotoquímico que el material autóctono (Catalán *et al.*, 2013), por lo que la CDOM en la Luna es rápidamente degradada en los meses de alta RUV. Esto explicaría la alta variabilidad de la S_R en La Luna en ambas temporadas, a diferencia de El Sol, que posee una mayor turbidez, mayor atenuación UV y posiblemente menores tasas de fotodegradación de CDOM.

Conclusiones

Como se observó para los lagos El Sol y La Luna, las propiedades ópticas, las fuentes y la composición química de la CDOM, juegan un papel fundamental en los lagos alpinos remotos, que muestran tendencias en función de los aportes atmosféricos, la radiación solar incidente y el procesamiento bacteriano (Mladenov *et al.*, 2011). Los resultados de este estudio indican que El Sol tiene mayor concentración de CDOM que su vecino La Luna (evidenciada por el coeficiente de absorción a_{350}). Contrario a lo esperado, los aportes autóctonos de CDOM en El Sol son más importantes durante la temporada de lluvias ($S_R>1$), mientras que, durante la estación fría-seca, el ingreso alóctono de CDOM de alto peso molecular ($S_R\sim 1$), derivado de los suelos agrícolas alrededor del nevado, son probablemente el principal impulsor de absorción de CDOM. En La Luna, los aportes autóctonos de CDOM son reducidos debido al pH ácido, menor abundancia bacteriana, ausencia de macrófitos y a la alta radiación UV que limita el desarrollo de fitoplancton. La menor $S_{275-295}$ en La Luna sugiere que el reservorio principal de CDOM se caracteriza por compuestos de alto peso molecular derivados fundamentalmente de aportes atmosféricos y de su cuenca de drenaje. Sin embargo, sus condiciones de mayor sensibilidad a la RUV promueven una fotodegradación más intensa que en El Sol, lo que se ve reflejado en altas pendientes espectrales. No se distinguieron diferencias de la CDOM entre la superficie y fondo en ningún caso. Futuros estudios deben incluir sistemáticamente el efecto a largo plazo del depósito seco y húmedo sobre la composición de CDOM y su relación con el DOC de ambos lagos para dilucidar los procesos biogeoquímicos en los dos únicos LAM en México.

Agradecimientos

El presente trabajo fue financiado por el proyecto PINCC 2020-2021 “Cuerpos Acuáticos Epicontinentales: *Papel en la Dinámica del Carbono y Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en México*” y PINCC 2023 “Cuerpos Acuáticos Epicontinentales: *Papel en la Dinámica del Carbono y Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en México. Segunda parte. Eutroficación y emisión de GEI.*” Un agradecimiento especial al Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM y a los colegas del equipo de Limnología Tropical de la FES Iztacala (UNAM) por su apoyo en el trabajo de campo. Asimismo, a la Comisión Estatal de Parques Naturales y de la Fauna de la Secretaría de Ecología, Gobierno del Estado de México, que proporcionó el permiso para llevar a cabo esta investigación científica en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.

Literatura citada

- Adrian, R., C. M. O'Reilly, H. Zagarese, S. B. Baines, D. O. Hessen, W. Keller, D. M. Livingstone, R. Sommaruga, D. Straile, E. Van Donk, G. A. Weyhenmeyer, y M. Winder. 2009. Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and Oceanography* 54:2283–2297. https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2283.
- Alcocer, J., L. A. Oseguera, E. Escobar, L. Peralta, y A. Lugo. 2004. Phytoplankton Biomass and Water Chemistry in Two High-Mountain Tropical Lakes in Central Mexico. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 36:342–346. [https://doi.org/10.1657/1523-0430\(2004\)036](https://doi.org/10.1657/1523-0430(2004)036).
- Alcocer, J., C. N. Delgado, y R. Sommaruga. 2020a. Photoprotective compounds in zooplankton of two adjacent tropical high mountain lakes with contrasting underwater light climate and fish occurrence. *Journal of Plankton Research* 42:105–118. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbaa001>.
- Alcocer, J., J. Roberson, L. A. Oseguera, y W. M. Lewis. 2020b. Rhythmic episodes of heating and cooling control thermal stratification of two tropical high mountain lakes. *Aquatic Sciences* 82:1–11. <https://doi.org/10.1007/s00027-020-00731-1>.
- Alcocer, J., A. C. Ruiz-Fernández, L. A. Oseguera, M. Caballero, J. A. Sanchez-Cabeza, L. H. Pérez-Bernal, y D. M. Hernández-Rivera. 2020c. Sediment carbon storage increases in tropical, oligotrophic, high mountain lakes. *Anthropocene* 32:100272. <https://doi.org/10.1016/J.ANCENE.2020.100272>.
- Arar, E. J., y G. B. Collins. 1997. Method 445.0 In vitro determination of Chlorophyll a and Pheophytin in marine and freshwater algae by fluorescence. Página U.S. Environmental Protection Agency. United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development. National Exposure Research Laboratory, Cincinnati.
- Armienta, M. A., D. la S. De La Cruz-Reyna, y J. L. Macías. 2000. Chemical characteristics of the crater lakes of Popocatepetl, El Chichón, and Nevado de Toluca volcanoes, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 97:105–125. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(99\)00157-2](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(99)00157-2).
- Aucancela, R., J. Alcocer, I. Soria-Reinoso, L. A. Oseguera-Pérez, y D. Ibarra-Morales. 2020. Carbono orgánico disuelto en dos lagos tropicales de alta montaña, El Sol y La Luna, Nevado de Toluca. 98–104. En: M. Hernández, M. Rojo, M. Fuentes, A. Velázquez, y M. Bolaños (eds). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2020. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con la Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco, Texcoco, Estado de México, México*. 603 p.
- Barba-López, M. del R., A. Filonov, J. Alcocer, L. Ladah, y I. Tereshchenko. 2021. Complex interactions between meteorological parameters and the thermal regime of two tropical, high altitude crater lakes (Nevado de Toluca, Mexico). *Science of the Total Environment* 771. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145310>.
- Battin, T. J., S. Luyssaert, L. A. Kaplan, A. K. Aufdenkampe, A. Richter, y L. J. Tranvik. 2009. The boundless carbon cycle. *Nature Geoscience* 2:598–600. <https://doi.org/10.1038/ngeo618>.
- Catalán, N., B. Obrador, M. Felip, y J. L. Pretus. 2013. Higher reactivity of allochthonous vs. autochthonous DOC sources in a shallow lake. *Aquatic Sciences* 75:581–593. <https://doi.org/10.1007/s00027-013-0302-y>.
- Cuna, E., J. Alcocer, M. Gaytán, y M. Caballero. 2022. Phytoplankton Biodiversity in Two Tropical, High Mountain Lakes in Central Mexico. *Diversity* 14:1–17. <https://doi.org/10.3390/d14010042>.
- Gerea, M., G. L. Pérez, F. Unrein, C. Soto Cárdenas, D. Morris, y C. Queimaliños. 2017. CDOM and the underwater light climate in two shallow North Patagonian lakes: evaluating the effects on nano and microphytoplankton community structure. *Aquatic Sciences* 79:231–248. <https://doi.org/10.1007/s00027-016-0493-0>.
- Helms, J. R., A. Stubbins, J. D. Ritchie, E. C. Minor, D. J. Kieber, y K. Mopper. 2008. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter. *Limnology and Oceanography* 53:955–969. <https://doi.org/10.4319/lo.2008.53.3.0955>.
- Ibarra-Morales, D., J. Alcocer, L. A. Oseguera, y R. Sosa-Echeverría. 2020. Bulk Deposition and Main Ionic Composition in a Remote Tropical Region: Nevado de Toluca, Mexico. *Water, Air, and Soil Pollution* 231. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04785-7>.
- Ibarra-Morales, D., R. A. Silva-Aguilera, L. A. Oseguera, M. Merino-Ibarra, y J. Alcocer. 2022. Impacts of global change on two tropical, high mountain lakes in Central Mexico. *Science of The Total Environment* 852:158521. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.158521>.
- Jiménez-Seinos, J. L., J. Alcocer, y D. Planas. 2023. Food web differences between two neighboring tropical high mountain lakes and the influence of introducing a new top predator. *PLOS ONE* 18:e0287066. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0287066>.
- Li, P., y J. Hur. 2017. Utilization of UV-Vis spectroscopy and related data analyses for dissolved organic matter (DOM) studies: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 47:131–154. <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1309186>.
- Massicotte, P., E. Asmala, C. Stedmon, y S. Markager. 2017. Global distribution of dissolved organic matter along the aquatic continuum:

- Across rivers, lakes and oceans. *Science of the Total Environment* 609:180–191. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.076>.
- Mladenov, N., R. Sommaruga, R. Morales-Baquero, I. Laurion, L. Camarero, M. C. Diéguez, A. Camacho, A. Delgado, O. Torres, Z. Chen, M. Felip, y I. Reche. 2011. Dust inputs and bacteria influence dissolved organic matter in clear alpine lakes. *Nature Communications* 2:1–7. <https://doi.org/10.1038/ncomms1411>.
- SMN-CONAGUA. 2023. Información Estadística Climatológica. México. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica> (Consulta: julio 16, 2023).
- Sobek, S., L. J. Tranvik, Y. T. Prairie, P. Kortelainen, y J. J. Cole. 2007. Patterns and regulation of dissolved organic carbon: An analysis of 7,500 widely distributed lakes. *Limnology and Oceanography* 52:1208–1219. <https://doi.org/10.4319/LO.2007.52.3.1208>.
- Sommaruga, R. 2001. The role of solar UV radiation in the ecology of alpine lakes. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 62:35–42. [https://doi.org/10.1016/S1011-1344\(01\)00154-3](https://doi.org/10.1016/S1011-1344(01)00154-3).
- Su, Y., F. Chen, y Z. Liu. 2015. Comparison of optical properties of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in alpine lakes above or below the tree line: Insights into sources of CDOM. *Photochemical and Photobiological Sciences* 14:1047–1062. <https://doi.org/10.1039/c4pp00478g>.
- Tranvik, L. J., J. A. Downing, J. B. Cotner, S. A. Loiselle, R. G. Striegl, T. J. Ballatore, P. Dillon, K. Finlay, K. Fortino, L. B. Knoll, P. L. Kortelainen, T. Kutser, S. Larsen, I. Laurion, D. M. Leeche, S. L. McCallister, D. M. McKnight, J. M. Melack, E. Overholt, J. A. Porter, Y. Prairie, W. H. Renwick, F. Roland, B. S. Sherman, D. W. Schindler, S. Sobek, A. Tremblay, M. J. Vanni, A. M. Verschoor, E. von Wachenfeldt, y G. A. Weyhenmeyer. 2009. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnology and Oceanography* 54:6 2298–2314. https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2298.
- Zhang, Y., G. Gao, K. Shi, C. Niu, Y. Zhou, B. Qin, y X. Liu. 2014. Absorption and fluorescence characteristics of rainwater CDOM and contribution to Lake Taihu, China. *Atmospheric Environment* 98:483–491. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.09.038>.
- Zhang, Y., L. Zhou, Y. Zhou, L. Zhang, X. Yao, K. Shi, E. Jeppesen, Q. Yu, y W. Zhu. 2021. Chromophoric dissolved organic matter in inland waters: Present knowledge and future challenges. *Science of the Total Environment* 759. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143550>.



Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México. Síntesis a 2023

PROGRAMA MEXICANO DEL CARBONO

J. Martín Hernández Ayón
Martín A. Bolaños González,
C. Orión Norzagaray López
Luz de Lourdes A. Coronado Álvarez
Patricia Ibarra Alonso
Editores

2023

Año 5

Número 5



PM_C
Programa Mexicano del Carbono
RED TEMÁTICA DEL CONACYT



io
Instituto de
Investigaciones
Oceanológicas

Stanford | México Clean
Economy 2050

**THE OCEAN
FOUNDATION**



Forma correcta de citar:

Hernández Ayón J. M.; Bolaños González M. A.; Norzagaray López C. O.; Coronado Álvarez L. e Ibarra Alonso P. (Editores). 2023. Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2023. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con la Universidad Autónoma de Baja California (UABC). Texcoco, Estado de México, México. ISSN 2954-4882. 326 p.

Programa Mexicano del Carbono A.C.
Calle Chiconautla No. 8 Interior A
Colonia Lomas de Cristo, Texcoco, Estado de México, México

www.pmcarbono.org

Esta obra fue elaborada por el Programa Mexicano del Carbono (PMC).

Se prohíbe la reproducción parcial o total de esta obra, por cualquier medio.

Diseño Gráfico: Oscar J. Velázquez R.

ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO DEL CICLO DEL CARBONO Y SUS INTERACCIONES EN MEXICO. Año 5, No. 5, enero - diciembre de 2023. Es una publicación anual editada por el Programa Mexicano del Carbono, A.C., calle Chiconautla No. 8 Interior A, Colonia Lomas de Cristo, C.P. 56225 Texcoco, Estado de México, México. Tel. +52 (595) 951•2182, www.pmcarbono.org Editor responsable: José Martín Hernández Ayón. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2022-121910292200-102, ISSN 2954-4882. Ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número: José Martín Hernández Ayón, Calle Chiconautla No. 8 Interior A, Colonia Lomas de Cristo, C.P. 56225 Texcoco, Estado de México, México, fecha de última modificación, diciembre de 2023.

Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2023

J. Martín Hernández Ayón, Martín A. Bolaños González,
C. Orión Norzagaray López, Luz de Lourdes A. Coronado Álvarez
y Patricia Ibarra Alonso

EDITORES

Programa Mexicano del Carbono (PMC)
Universidad Autónoma de Baja California (UABC)

Ensenada, Baja California, México

Diciembre 2023