



Algunas consideraciones sobre 30 años de registro de parámetros físico-químicos del Lago Masaya.

Camilo Fuentes-Peña¹

Laboratorio de Radioquímica Ambiental, Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA/UNAN-Managua).

RESUMEN

A partir de un registro histórico del CIRA/UNAN-Managua comprendido entre 1988 y 2013 se sintetizaron y analizaron datos de 33 variables físico-químicas selectas del Lago Masaya para ofrecer una actualización, una descripción detallada de sus rangos naturales y de sus relaciones, a la vez que una identificación de los parámetros de mayor dispersión, tanto en términos de su variabilidad natural como de su estabilidad en la columna de agua. Los resultados indican que en comparación con los primeros datos reportados en la década de los '70s el Lago ha experimentado una reducción leve (>1%) de Cl^- , Ca^{2+} , dureza total y pH, una reducción significativa (>35%) de NO_3^{2-} , B, PO_4^{3-} T, a la vez que un incremento considerable (>9%) de HCO_3^- , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ , así como un aumento significativo (>

40%) de CO_3^{2-} , F^- , y particularmente elevado (> 400%) de SiO_2 y NO_2^- , siendo influyentes sobre la CE tanto HCO_3^- , Na^+ así como NO_2^- . De igual manera, la relación DQO/DBO₅ ha incrementado en casi un 70% y la proporción de Ca^{2+} en relación a otros cationes ha disminuido. Finalmente, los resultados sugieren que HCO_3^- , Na^+ , CO_3^{2-} , K^+ , FT, alcalinidad total, DBO₅, temperatura, CE y pH son las variables que mejor podrían explicar las condiciones físico-químicas de este lago. También se observó que el estatus trófico del Lago se mantiene alternando entre eutrófico e hipereutrófico lo que implica la urgente necesidad de llevar a cabo esfuerzos de rehabilitación en el Lago.

Palabras clave: Lago Masaya, parámetros físico-químicos, variabilidad natural.

¹DATOS DEL AUTOR

Nueva afiliación: Investigador independiente
Correo electrónico: camilofuentes@gmail.com.

Some considerations about 30 years records of physical-chemical parameters from Lake Masaya.

ABSTRACT

From a historical record of the CIRA/UNAN-Managua between 1988 and 2013, data from 33 selected physical-chemical variables of Lake Masaya were synthesized and analyzed to update a detailed description of their natural ranges and their relationships, as well as an identification of the greater dispersion parameters, both in terms of its natural variability and its stability in the water column. In comparison with the first set of data reported by the 1970s, the Lake has experienced a slight reduction (>1%) of Cl^- , Ca^{2+} , *total hardness*, and pH, also a significant reduction (>35%) in NO_3^{2-} , B, and *total* PO_4^{3-} , at the same time as a considerable increase (>9%) of HCO_3^- , Mg^{2+} , Na^+ , and K^+ , again a significant increase (>40%) in CO_3^{2-} ,

F^- , a particularly high (>400%) increase in SiO_2 and NO_2^- , being influential on the EC both the HCO_3^- , Na^+ and NO_2^- . Likewise, the COD/BOD₅ ratio has increased by almost 70% and the proportion of Ca^{2+} in relation to other cations has decreased. Finally, the results suggest that HCO_3^- , Na^+ , CO_3^{2-} , K^+ , total phosphorus, total alkalinity, BOD₅, temperature, EC and pH are the variables that could best explain the physical-chemical conditions in this lake. It was also noted that the trophic status of the Lake has been alternating between eutrophic and hypereutrophic which implies the urgency in developing efforts to restore the Lake.

Key words: Lake Masaya, physico-chemical parameters, natural variability.

INTRODUCCIÓN

El Lago Masaya es un cuerpo de agua tropical de origen volcánico (McBirney, 1956), sobre el cual se han descrito sus características morfológicas esenciales, tales como superficie del espejo de agua, profundidad media y máxima, longitud y ancho (Incer-Barquero & Gutiérrez, 1975; BANIC, 1977; Larson, 1989), algunas consideradas en la revisión de Waid, Raesly, McKay & McCrary (1999) con actualizaciones recientes por INETER (2001; 2006a; 2006b);

En el proceso, sin embargo, fueron descuidadas las variables físico químicas, habiendo una única publicación dedicada su descripción (Barlow, Baylis, & Roberts, 1976), a pesar de ser variables fundamentales puesto que definen y afectan el medio en el cual los organismos viven y los fenómenos ecológicos ocurren (Brönmark & Hansson, 2005).

Afortunadamente para este lago existe un historial de monitoreo ambiental que dio seguimiento a los esfuerzos de Barlow et al. (1976) realizado por el Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (en adelante CIRA) con más de tres décadas de registros, enfocándose tanto en parámetros del Lago como de las lagunas de estabilización de la ciudad de Masaya (CIRA/UNAN-Managua, 2013).

Para contribuir a cerrar esta brecha de información y dada la importancia que estas variables representan para el estudio y comprensión de las aguas continentales, se ha elaborado este trabajo, para lo cual ha sido necesario organizar de forma lógica más de 7000 registros provenientes de mediciones *in situ* y en laboratorio, realizadas por el CIRA entre 1988 y 2013. De esta manera se sintetizó información sobre más de 30 parámetros físico-químicos del Lago

Masaya, ofreciendo una actualización y descripción detallada de sus rangos, sus relaciones e identificando los que encierran la mayor variabilidad natural, así como aquellos de mayor estabilidad en la columna de agua, siendo propuestos como variables de referencia para estudios futuros.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

El Lago Masaya está localizado 27 km al SO de Managua (Nicaragua), al sur de la ciudad de Nindirí y oeste de la ciudad homónima (Fig.1). Es parte integral del Parque Nacional Volcán Masaya-PNVM (Incer-Barquero y Gutiérrez, 1975) y pertenece a la cuenca del Río San Juan o de los grandes lagos Nicaragüenses (MARENA, 2010).

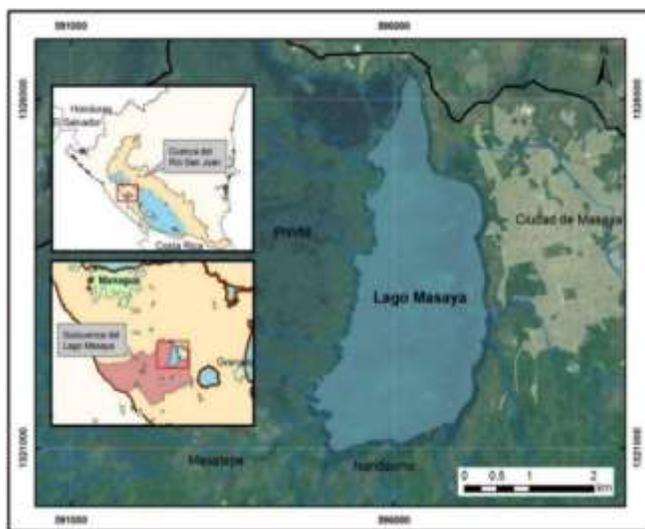


Fig. 1 Micro y macro-localización del Lago Masaya. Mapa elaborado en ArcMap (ArcGIS) 10.0, sobre la base cartográfica de INETER (2006c) e imagen obtenida en ArcGlobe Image.

El Lago es un cuerpo de agua cálido, con temperaturas superficiales entre 26 y 31 °C (este trabajo). Desde hace décadas se ha considerado como eutrofizado (Barlow et al., 1976), siendo alimentado superficialmente de manera continua por el efluente de las lagunas de estabilización de la ciudad de Masaya (Salinas, 2007; CIRA/UNAN-Managua, 2013) que drena hacia el sector NE

del Lago desde la década de los '70s, y de forma intermitente por las aguas y sedimentos drenan desde el área agrícola de la Meseta de Carazo y municipios del sur, atravesando una matriz con diferentes usos de la tierra (Alcaldía de Masaya & AMICTLAN, 2009; López y Prado, 2013).

Base de datos

Se elaboró una base de datos inicialmente constituida por más de 40 variables, la cual, para facilidad de análisis y robustez estadística fue limitada a variables con $n \geq 30$ valores, consistiendo ésta en datos discontinuos de 11 años distintos entre 1988 y 2013. En la Tabla 1 se presentan los datos de interés de las 33 variables se lectas en orden de mayor a menor cantidad de registros: Calcio (Ca^{2+}), Magnesio (Mg^{2+}), Cloruro (Cl^-), Bicarbonato (HCO_3^-), Sodio (Na^+), Sulfatos (SO_4^{2-}), pH, Potasio (K^+), Conductividad Eléctrica (CE), Carbonatos (CO_3^{2-}), Dureza Total (Dza-T), Alcalinidad Total (Alc.-T), Sólidos Totales Disueltos (STD), Fósforo Total (FT), Turbidez (Turbid.), Flúor (F^-), Temperatura (Temp.), Boro (B), Alcalinidad Fenolftaleína (Alc.-fen.), Oxígeno Disuelto (OD), Nitratos (NO_3^{2-}), Hierro Total (Fe-T), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Fósforo Disuelto Total (FTD), Ortofosfato Total (PO_4^{3-} T) y Disuelto (PO_4^{3-} d), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Amonio (NH_4^+), Manganeseo Total (Mn), Aluminio Total (Al), Sílice Disuelta (SiO_2), Nitratos (NO_2^-) y Potencial de Oxidación-Reducción (ORP).

Distribución

La distribución de cada variable se presenta en histogramas (Fig. 4) elaborados en SPSS v.20, excluyéndose únicamente el ORP que presenta algunos valores negativos, evitando así la distorsión visual de las demás variables.

Perfiles

Dada la relevancia de la temperatura y el OD, se presentan en la Fig. 6 perfiles detallados de cada uno (Fig. 6A y 6B, izquierda), calculándose el promedio a 1 DE y 2 DE (Fig. 6A y 6B, derecha) para distintas capas o rangos de profundidad (en metros): para la temperatura a 0, 0.5-1, 2-6, 8-10, 14-15, 18-20, 23-26, 30-34, 39-42, 47-50, 54-55, 59-61, 64-65 y ≥ 69 , para el OD a 0, 0.5-1, 2-6, 8-14, 18-20, 24-26, 30-32, 39-42, 47-50, 54-55, 59-61, ≥ 69 . Los promedios y rangos (1DE, 2DE) de la temperatura fueron estimados en base a registros de ocho años (1988, 1990-1993, 2008, 2012-2013) y el OD de seis (1991-1993, 2008, 2012-2013).

Promedios mensuales de velocidad del viento del viento, precipitación y nivel del Lago se muestran en la Fig. 6C. Las primeras dos variables fueron procesadas a partir del registro histórico de la estación pluviométrica N°69115, localizada a 210 msnm en 597439.7E 1324500.1N y el nivel a partir de la estación 'Masaya' localizada al SO del Lago en 594910.5E 1320897.8N, instalada 15m bajo la superficie del suelo. Ambas estaciones del INETER.

Los perfiles de las otras variables se presentan en gráficos de dispersión (Fig. 7) elaborados en Excel 2013 con valores correspondientes a diferentes rangos de tiempo, según la variable.

Variables determinantes

Se clasificaron como variables determinantes aquellas que encerraron la mayor variabilidad estadística de entre un grupo de variables potenciales: Temperatura, pH, CE, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , Na^+ , SO_4^{2-} , K^+ , CO_3^{2-} , Dza-T, Alc.-T, FT, F^- , B, STD, Fe-T, DBO_5 , PO_4^{3-} , NH^+ y FTD, incluyéndose la profundidad, todas con $n \geq 72$. Para identificarlas se realizó un análisis de

componentes principales (PCA por sus siglas en inglés, Fig. 5) utilizando el programa PAST 3.14 (Hammer, Harper, & Ryan, 2001).

Correlaciones

En la Tabla 2 se presentan las correlaciones ρ de Spearman para las variables que tuvieron al menos un valor de $\rho \leq -0.5$ o $\rho \geq 0.5$. Para facilidad de lectura en la discusión han sido omitidos los valores 'p' y 'n' que corresponden a correlaciones declaradas en la Tabla 2, en caso contrario se han agregado como complementos de ρ .

RESULTADOS

Registros disponibles

Variables monitoreadas y número de registros

Desde 1988 el promedio de variables monitoreadas anualmente por el CIRA ha sido de 20, reduciéndose recientemente en 2008-2013 (minigráfico de la Fig. 2). Sin embargo, existen registros de parámetros de 2012-2013 no tomados en cuenta en este trabajo por carecer de referencia esenciales como profundidad de muestreo o por tener escasez de registros ($n < 30$).

La cantidad de datos analizados (1988-2013) por variable osciló de 40 (ORP) a 437 (Ca^{2+}), con una mediana (M_e) de **205**. En este sentido las variables con registros más cuantiosos fueron Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , Na^+ , SO_4^{2-} , pH, K^+ , CE, todas con > 400 datos, agrupando conjuntamente el 49% de los datos disponibles.

Años con registro

En términos de frecuencia temporal la M_e de años con registros fue de seis, siendo el 48% de los parámetros ($n=16$) superiores a la M_e , y de éstos, 12 con datos registrados en 9-11 años distintos.

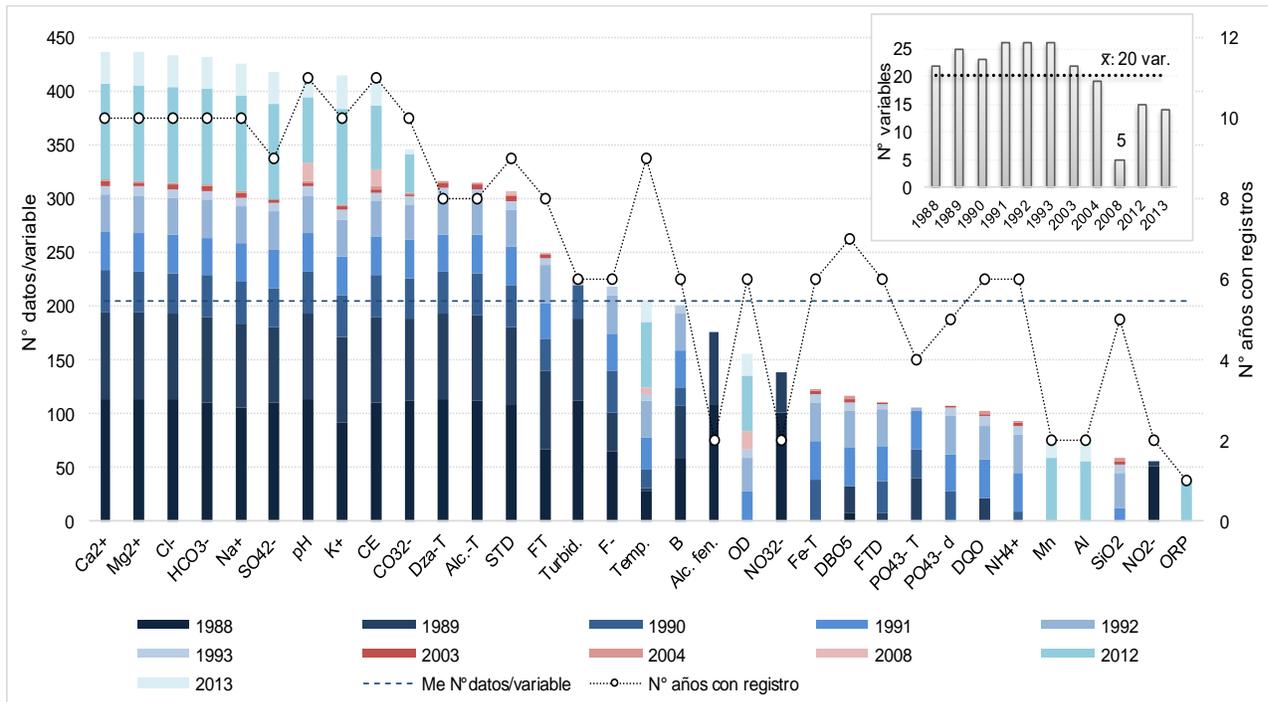


Fig. 2. Número de datos por variable y número de años con registros disponibles del Lago Masaya. \bar{x} : media, Me: mediana.

Profundidades de muestreo

En términos de profundidad (Fig.3), en los primeros años (1988-1989) fue priorizada la superficie del Lago hasta < 20m. En 1990 se mantuvo esta tendencia, siendo agregadas muestras de capas más profundas (30 y 60 m), sucediendo lo mismo en los años siguientes (1992-1993) pero sin monitorearse profundidades intermedias entre la superficie y 30 m, ni entre 30 y 60 m. Luego, después

de 10 años de ausencia de registros en 2003-2004 fueron tomadas muestras a > 65m, manteniéndose esa tendencia en años posteriores, aunque, los parámetros analizados estuvieron restringidos a ese estrato y a la superficie. En 2008 las muestras fueron tomadas en estratos consecutivos entre la capa superficial y el fondo. No fue sino hasta el muestreo más reciente (2012-2013) que aumentó la cantidad de estratos intermedios analizados.

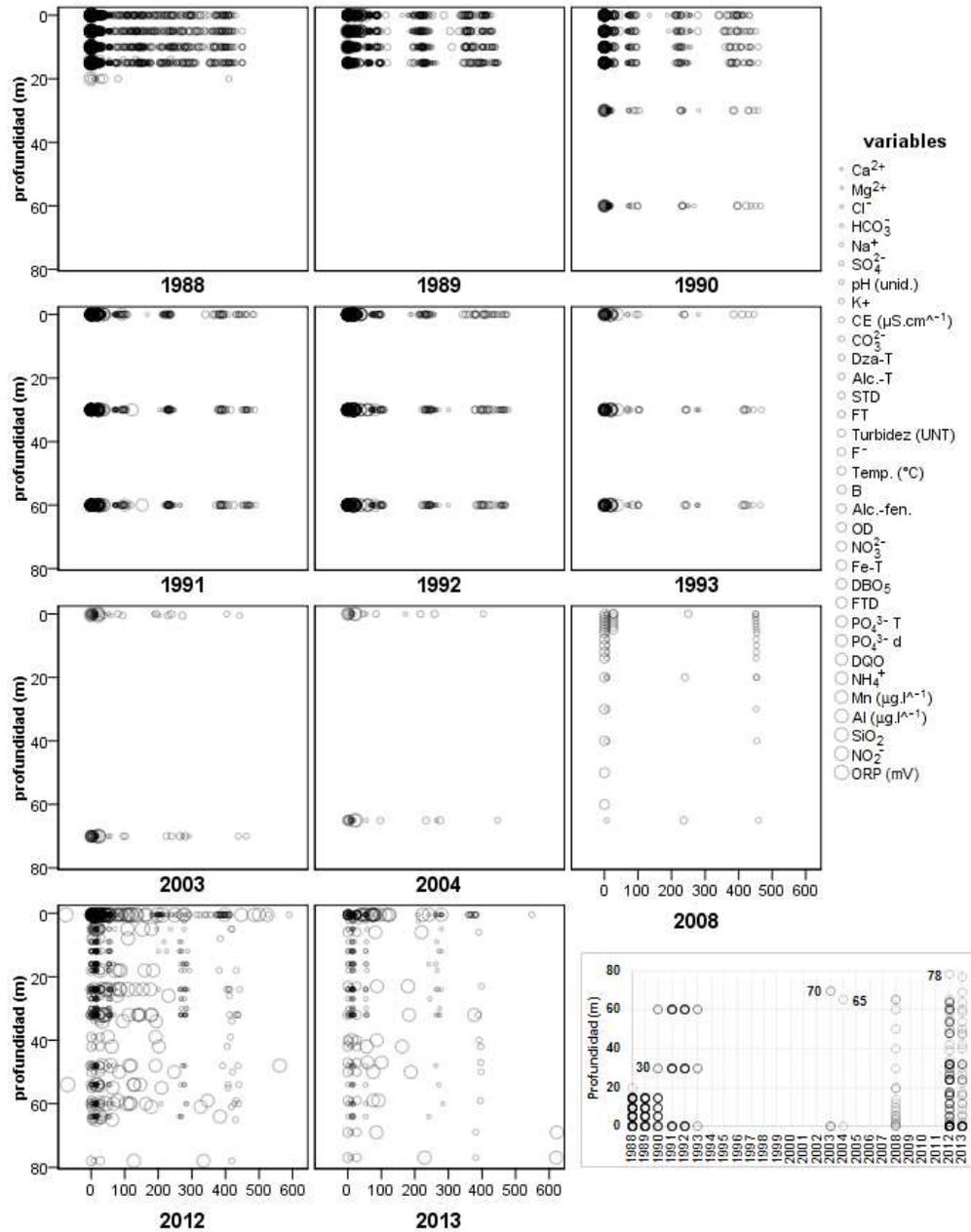


Fig. 3. Variables analizadas a diferentes profundidades por año de registro. Las unidades están dadas en mg.l^{-1} , excepto cuando se indica otra unidad entre paréntesis. El gráfico principal fue elaborado en SPSS v.20; el minigráfico incrustado (derecha inferior) en Excel 2013. El grosor y opacidad de los anillos representan la densidad de registros (mediciones) realizados: anillos más gruesos y densos (más oscuros) representan mayor cantidad de registros.

Distribución y rangos

En la (Fig. 4) se muestra la distribución de cada parámetro analizado. Debido a diferencias de escalas (centésimas a centenas) y extensión de rangos, los gráficos se presentan en escala log-log, por lo cual no logra apreciarse bien que el Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , Na^+ , pH, Alc.T, STD, Alc.-fen. y OD tienen distribuciones multimodales. De igual manera esta figura sugiere que los valores de Mn tienen distribución bimodal, lo que realmente no ocurre.

Alrededor del 70% (n=23) de las variables tiene distribución unimodal, y el restante 30% son bimodales (n=5) o con distribución no definida claramente (n=5). El 78% de las variables unimodales son asimétricas hacia la derecha, cerca del 17% son centradas o

simétricas, y únicamente una (HCO_3^-) es asimétrica hacia la izquierda. A pesar de sus dos valores negativos registrados, el ORP tiene asimetría predominante hacia la derecha (valores positivos).

Variables determinantes del Lago

Los resultados del PCA (Fig. 5) indicaron que los Componentes Principales (PC) 1 al 3 agrupan ~57% de la varianza total, encerrando el PC1 por sí solo ~33%. Las variables de mayor peso en el PC1 fueron: STD, Alc.-T, HCO_3^- , K^+ , Na^+ , Cl^- , B, PO_4^{3-} d, NH_4^+ , CE, Ca^{2+} , FTD y la profundidad, todas con correlaciones positivas; en el PC2: Temp., Dza-T y Mg^{2+} positivas, SO_4^{2-} , F- y FT negativas; en el PC3: pH, CO_3^{2-} positivas.

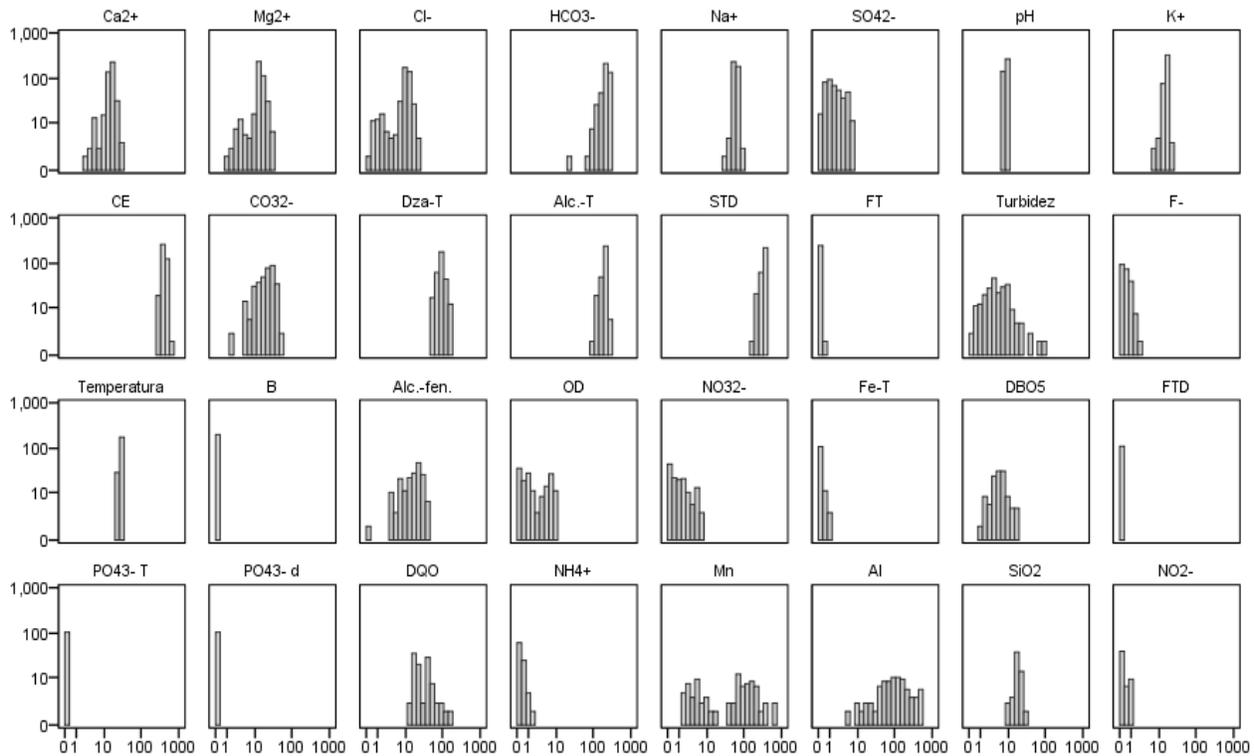


Fig. 4. Distribución de los valores de cada variable medida en aguas del Lago Masaya. Eje X (valor natural de la variable) y Y (frecuencia) en log₁₀. Las variables están organizadas en forma decreciente según el valor de datos disponibles (N). El número de intervalos (clases) utilizados en el eje X es de 25.

Tabla 1. Estadísticos descriptivos básicos de las variables (n=33) físico-químicas selectas del Lago Masaya.

AÑO	DIST.	REG.	1988	1989	1990	1991	1992	1993	2003	2004	2008	2012	2013	N	\bar{X}	DE	ME	MO	MÍN	MÁX
CA2+		10	114	80	39	36	35	8	4	2	-	89	30	437	15.37	3.73	15.87	16.03	2.90	31.68
MG2+		10	114	80	38	36	35	8	4	2	-	89	30	436	14.26	4.37	14.28	14.43	1.03	33.18
CL-	*	10	113	80	37	36	35	8	4	2	-	89	29	433	10.07	4.03	10.61	11.57	0.04	24.60
HCO3-		10	111	79	39	35	35	8	4	2	-	89	30	432	223.47	44.96	229.11	268.49	63.44	300.74
NA+	*	10	105	79	39	35	35	8	4	2	-	89	30	426	61.19	8.92	58.15	51.00	31.44	87.10
SO42-	↑	9	111	69	37	36	35	8	3	-	-	89	29	417	2.03	1.62	1.39	0.50	0.05	6.71
A PH	o	11	113	80	39	36	35	8	4	2	17	60	20	414	8.35	0.56	8.37	8.10	6.42	9.41
K+		10	92	79	39	36	35	8	4	2	-	89	30	414	15.15	1.10	15.15	15.00	7.00	21.60
B CE		11	111	79	39	36	32	8	4	2	17	59	20	407	414.68	41.47	415.00	400.00	255.00	590.00
CO32-		10	112	77	37	35	33	8	2	2	-	36	4	346	22.49	9.83	23.23	24.00	2.00	51.22
DZA-T		8	113	80	39	35	35	8	4	2	-	-	-	316	95.02	21.25	93.48	124.00	50.96	172.40
ALC.-T	*	8	112	79	39	36	35	8	4	2	-	-	-	315	210.00	33.71	223.50	148.00	108.00	278.30
STD	*	9	108	72	39	36	35	8	4	2	3	-	-	307	350.25	54.12	366.10	353.80	189.00	434.07
FT	↑	8	67	73	29	34	35	6	4	1	-	-	-	249	0.085	0.070	0.055	0.005	0.005	0.325
C TURB.	↑	6	112	76	31	-	-	2	4	2	-	-	-	227	6.38	8.88	4.00	3.00	0.24	85.00
F-	↑	6	65	36	39	35	35	8	-	-	-	-	-	218	0.439	0.403	0.383	0.005	0.004	2.530
D TEMP.		9	27	3	18	29	35	6	-	-	7	60	20	205	27.52	1.60	27.09	27.00	23.00	31.00
B		6	58	49	18	33	35	8	-	-	-	-	-	201	0.137	0.056	0.140	0.140	0.006	0.280
ALC.-FEN.	*	2	109	67	-	-	-	-	-	-	-	-	-	176	18.04	9.08	18.90	20.00	0.16	43.20
OD	↑	6	-	-	-	27	32	8	-	-	16	52	20	155	2.90	3.13	1.20	0.00	0.00	10.00
NO32-	↑	2	101	38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	139	1.43	1.71	0.80	0.03	0.00	7.42
FE-T	↑	6	-	-	39	36	35	8	3	2	-	-	-	123	0.14	0.16	0.08	0.01	0.01	0.83
DBO5		7	7	25	-	36	35	8	3	2	-	-	-	116	5.82	3.21	5.03	6.50	1.00	17.50
FTD	↑	6	-	7	30	33	34	5	2	-	-	-	-	111	0.020	0.018	0.016	0.005	0.005	0.081
PO43- T	↑	4	-	40	27	36	3	-	-	-	-	-	-	106	0.034	0.030	0.027	0.005	0.005	0.147
PO43- D	↑	5	-	-	27	35	35	8	1	-	-	-	-	106	0.012	0.011	0.005	0.005	0.005	0.058
DQO	↑	6	-	21	-	36	32	8	3	2	-	-	-	102	32.49	22.53	20.00	20.00	14.00	152.00
NH4+	↑	6	-	-	9	36	35	8	3	1	-	-	-	92	0.262	0.256	0.168	0.006	0.005	1.333
E MN	↑	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	58	20	78	96.36	120.05	75.79	2.93	1.40	622.79
E AL	↑	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	56	20	76	141.34	130.38	98.38	n.d.	5.89	561.61
SIO2		5	-	-	-	12	32	8	4	2	-	-	-	58	18.08	3.26	17.31	20.21	8.31	28.01
NO2-	↑	2	51	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	55	0.25	0.34	0.06	0.03	0.00	1.16
ORP	↑	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40	-	40	59.18	64.91	39.60	n.d.	-75.80	249.30
Σ (N/AÑO)			2026	1452	767	882	863	195	76	36	60	1044	332							

Unidades: a) unidades de pH, b) $\mu\text{S.cm}^{-1}$, c) UNT, d) $^{\circ}\text{C}$, e) $\mu\text{g.l}^{-1}$, f) mV, el resto de variables en mg.l^{-1} ; n.d.) no determinado por el software. Tipos de distribución (Dist.): *) bimodal, o) multimodal?. Registros y Estadística: reg.) años con registro, n) N° datos por variable, \bar{x}) media, DE) desviación estándar, Me) mediana, mín) mínimo, máx) máximo. Fueron estimadas las proporciones DE/\bar{x} y DE/Me según el tipo de distribución (centrada o asimétrica), utilizando en cada caso el parámetro estadístico (\bar{x} ó Me) que mejor representase a cada variable. Dado que se obtuvieron valores <1 para todas las variables en los cuales la proporción DE/\bar{x} fue calculada, únicamente se indican –con el símbolo \uparrow – los casos en los cuales la proporción DE/Me fue >1 . Algunas variables (FT, F-, B, FTD, PO43- T, PO43- d, NH4+) se presentan con tres decimales debido a la magnitud de su rango natural. Las distribuciones bimodales (Tabla 1 *) no fueron sub-clasificadas, sin embargo, de aquellas distribuciones categorizadas como no definidas claramente, tres aparentan ser simétricas (CE, Mg, Ca) y una con asimetría a la derecha (OD).

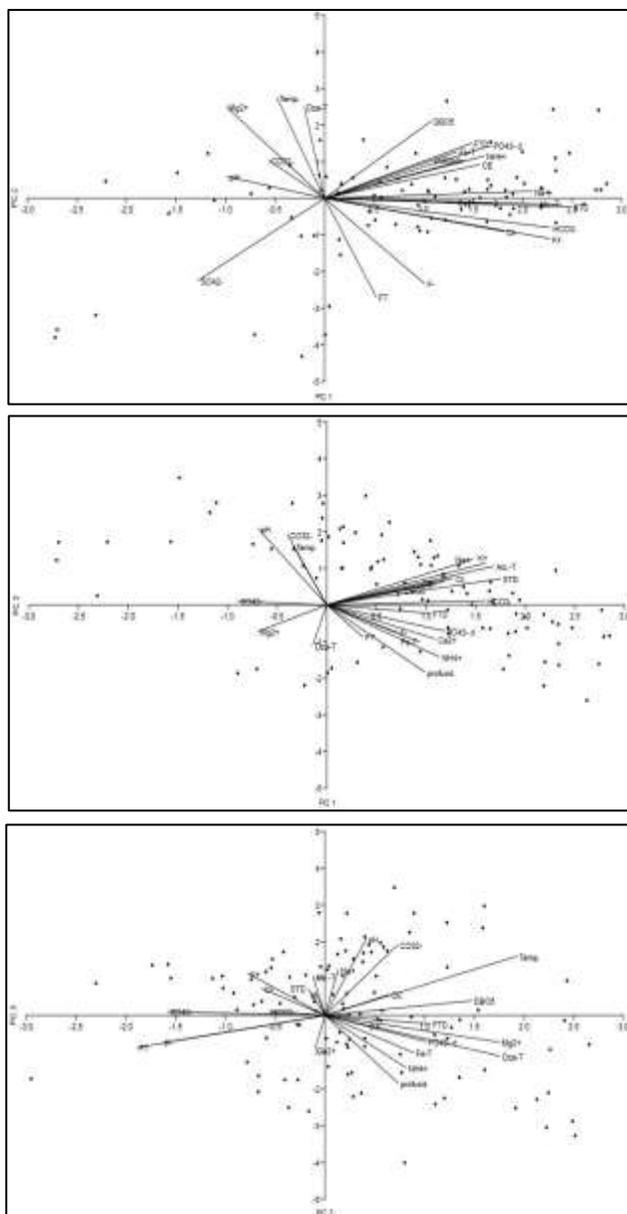


Fig. 5. Diagrama de Análisis de Componente Principal para variables físico-químicas de aguas del Lago Masaya. PC1 vs PC2 (arriba), PC1 vs PC3 (centro) y PC2 vs PC3 (abajo).

DISCUSIÓN

Variables mejor representadas en el registro histórico

A partir del cociente entre las variables >205 datos y variables >6 años de registros, ambas presentadas en la sección Registros disponibles (Resultados), se estimó el

número de datos por variable por año, siendo los parámetros mejor representados SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , Na^+ , K^+ , Dza-T , Alc.T , pH , CE , CO_3^{2-} , STD , FT y temperatura, mencionados en orden descendente desde 46 a 23 datos.año⁻¹. A pesar de existir suficientes registros para algunos parámetros (e.g.: cationes, aniones), otros importantes como OD , ORP , DQO y DBO_5 están pobremente representados (Fig. 2). Por otro lado, aumentó la profundidad de muestreo (Fig. 3) y además la cantidad de capas intermedias entre el primer estrato y el fondo, lo que no ocurrió con el número de variables monitoreadas, disminuyendo desde ~25 en 1998-2004 hasta < 20 en 2008-2013.

Distribuciones

En base a sus rangos y distribuciones, la mayoría de parámetros son unimodales con asimetría hacia la derecha, indicando esto, gran dispersión de los valores superiores a sus propias Me.

De éstos, los parámetros con mayor dispersión ($\text{DE}/\text{Me} > 1$) –indicados con ↑ en la Tabla 1– fueron NO_2^- , OD , PO_4^{3-} d, NO_3^- , Fe-T , ORP , Mn , NH_4^+ , Al , FT , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} T, DQO y F^- , ordenados de mayor a menor dispersión.

En el otro extremo los parámetros más estables ($\text{DE}/\text{Me} \leq 0.2$) fueron: con asimetría a la izquierda HCO_3^- , con asimetría a la derecha: Na^+ , Alc.-T , STD , pH y temperatura; y simétricos: SiO_2 , CE y K .

Estratificación

El Lago tiene un período (Fig. 6A: izquierda). Luego, a inicios de la época seca en noviembre, la columna sufre una reducción crítica de la estabilidad de estratificación, acentuada por los vientos fríos y veloces de

diciembre y enero (Fig. 6C), provocando la mezcla de la columna y homogenizando la temperatura, manteniéndose así hasta enero-febrero.

Los perfiles ponderados de temperatura y OD (Fig. 6A y 6B, derecha) indican la presencia del epilimnio desde la superficie hasta los 10 m de profundidad en una zona de poca estabilidad, seguido del metalimnio ubicado entre los metros 10 y 20, y un hipolimnion identificable a partir del metro 20 hasta el fondo.

Como es de esperar para lagos profundos, el hipolimnion está localizado en la capa de mayor estabilidad térmica y de menor variación en la concentración de OD, exceptuando por las fluctuaciones notorias a 30 y 60 m bajo la superficie del agua (Fig. 6, zona iv), especialmente en el punto central y de mayor profundidad del Lago (Fig. 6, C/PC-01), presentándose tanto en época seca (OD: noviembre, enero, abril) como lluviosa (Temp.: mayo, julio, octubre; OD: mayo, julio, septiembre, octubre).

En concordancia con la estratificación térmica, la mayoría de las variables mostraron mayor dispersión entre el epilimnio y metalimnio (Fig. 7), excepto Fe-T, FTD, PO43- T, PO43- d, DQO y NH4+ con mayor variabilidad hacia el fondo. Pocas se conservaron constantes en la columna (K+, DBO5, B), algunas incrementaron (NH4+, Mn, HCO3-, CE, FTD, PO43- d, SiO2, STD, Fe-T) y otras disminuyeron (OD, temperatura, pH, Alc.-fen., CO32-, SO42-) con la profundidad.

Temperatura y pH

La temperatura promedio de la columna de agua es de 27.52 ± 1.60 °C, oscilando desde 23-24°C en el fondo hasta 31°C en la superficie,

manteniendo este mismo patrón tanto en época seca como lluviosa. Si bien existe una correlación positiva (todos los datos, $n=140$, Tabla 2) entre la temperatura y el OD ($\rho=0.75$), ésta se mantiene únicamente en la superficie ($\rho=0.46$, $p<0.01$, $n=67$) y en las capas más profundas (58 a 62 m: $\rho=0.43$, $p<0.01$, $n=22$), pero no en las intermedias, lo que sugiere un efecto indirecto del descenso de ambas con la profundidad (Temp.: $\rho= -0.56$; OD: $\rho= -0.75$).

Por otra parte, el pH alcalino del Lago (8.35 ± 0.56 unidades) podría estar explicado por el impacto de los procesos degradativos debido a la carga alóctona aportada en la época seca cuando el Lago depende de flujos subterráneos (INETER, 1988; (Fig. 6C) y por drenaje superficial en la época lluviosa (JICA & INAA, 1993), e internamente debido a la alta actividad fotosintética que acompaña a las floraciones algales dominadas por Cianobacterias (Hooker, Chow, & Saavedra, 1992), iniciando con la reducción del CO2 libre por las algas (Barlow et al., 1976) y produciéndose luego iones H+ asociados a los HCO3-, elevando de esa forma el pH (Brönmark & Hansson, 2005).

Como es típico, se obtuvo correlación positiva de los carbonatos con el pH ($\rho=0.62$), sucediendo lo contrario con los bicarbonatos ($\rho=-0.59$), lo que sugiere que en las capas profundas predominan los HCO3-, en correspondencia con el descenso del pH en profundidad ($\rho= -0.52$).

A pesar de su variabilidad espacial y temporal, el pH ha oscilado dentro del rango recomendado por la EPA (2017) para la vida acuática (6.5-9 unidades), al mantenerse restringido dentro del mismo en un 94% las mediciones realizadas en época seca y en un 82% las de época lluviosa.

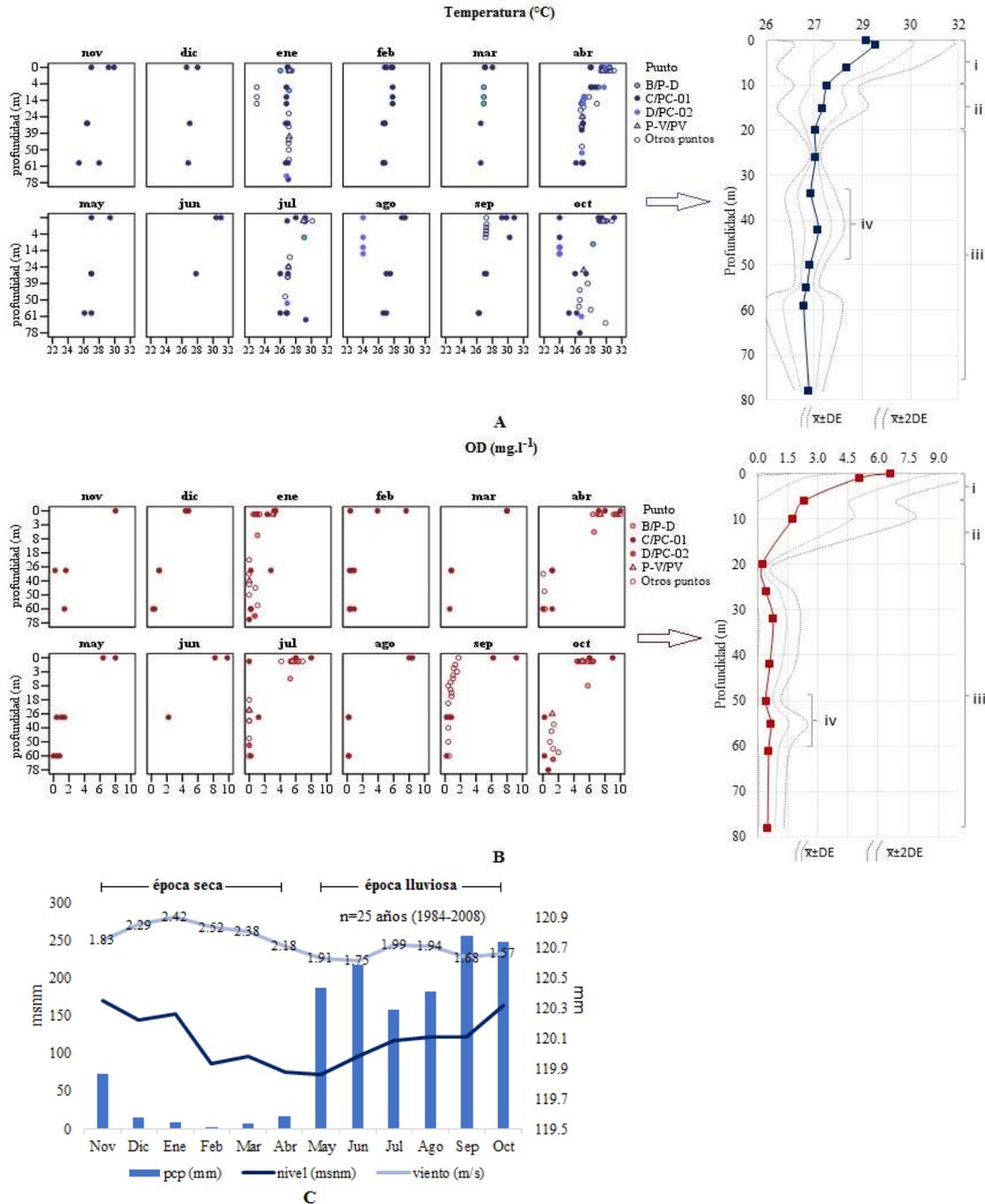


Fig. 6. Perfiles de temperatura y OD en la columna de agua, y promedios mensuales de precipitación, velocidad del viento y nivel del Lago Masaya. En los perfiles de temperatura y OD (figura A y B izquierda) se indican los diversos nombres otorgados (separados por /) a puntos de muestreo estratégicos del Lago: B/P-D: zona de influencia de la caída (al NE) del effluente de las lagunas de oxidación de la ciudad de Masaya; C/PC-01: punto central del Lago; D/PC-02: punto central al sur del PC-01; PV: extremo sur, en la zona de influencia de la descarga de los cauces que drenan desde la zona agrícola hasta la playa Venecia. Perfiles ponderados de temperatura y oxígeno (A y B derecha) construidos con los promedios a diferentes profundidades. Las curvas punteadas representan el rango de los promedios a 1DE (interna) y a 2DE (externa). Se indican 4 zonas, i: *epilimnio*, ii: *metalimnio*, iii: *hipolimnio*, iv: *fluctuaciones*.

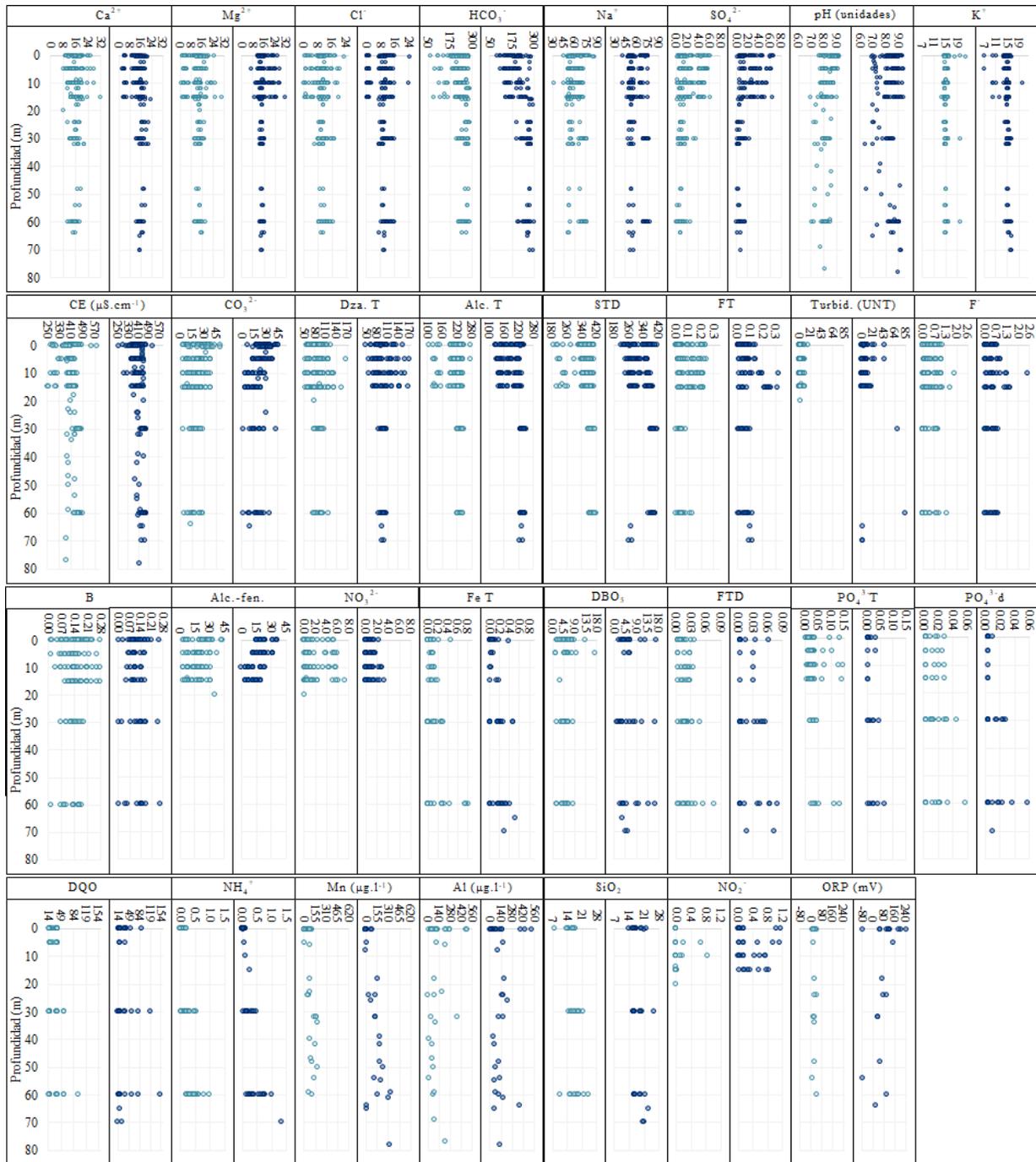


Fig. 7. Perfiles limnológicos de 31 variables selectas, en la columna de agua del Lago Masaya, por época.

Excluidas OD y Temperatura. Época seca: círculos celestes; lluviosa: azules. Las unidades en mg.l^{-1} , exceptuando cuando se indique entre paréntesis.

CE y STD

La CE de la columna ha oscilado entre 255 y 590 con una media de $414.68 \pm 41.47 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ y, los STD entre 189 y 434 con un promedio de $350.25 \pm 41.47 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ (Tabla 1). La concentración de STD estuvo positivamente correlacionada con la de HCO_3^- ($\rho=0.86$), Na^+ ($\rho=0.75$) y NO_2^- ($\rho=0.61$), razón por la que fueron detectadas en el componente principal 1 del PCA (Fig. 5), de modo que el equilibrio de estos tres parámetros podría estar regulando de forma directa la CE del Lago.

Se observó una relación negativa entre los STD y la turbidez ($\rho= -0.34$) que podría explicarse por el consumo de nutrientes por parte de las algas, las que aprovechando su abundante disponibilidad durante los meses lluviosos logran sostener sus demandas, derivando en floraciones algales (Hooker et al., 1992) que a su vez reducen la transparencia en la zona fótica al duplicarse la turbidez (Fig. 7) durante estos meses. Para el período analizado el valor mediano de turbidez ha sido de 4 UNT, con un rango entre 0.24 y 85 UNT.

ORP

El ORP tiene un rango de variación entre -75.80 y 249.30 mV, teniendo una M_e de 39.6 mV.

Si bien el conjunto de valores indiferenciado (épocas juntas) no se correlacionó con ningún otro parámetro, cuando se analizó por separado se obtuvo una correlación negativa con la concentración de Mn ($\rho= -0.63$, $p<0.01$, $n=20$) en período lluvioso, confirmado por una baja pero significativa bondad de ajuste curvilíneo ($R^2=0.38$, $p<0.01$) que indica que en este período, a medida que aumenta el ORP disminuye el Mn. Las mayores concentraciones en el hipolimnion podrían ser producto de condiciones reductoras en los sedimentos del fondo, las cuales favorecerían la liberación de

formas solubles de Mn y Fe (Golterman, 1975), siendo un indicador de ello el incremento observado del Fe-T con el descenso del OD ($\rho= -0.39$).

OD, DQO, DBO

En el epilimnion, el OD promedio es de $5.26 \pm 3.27 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ (ppm) en época seca y 5.21 ± 2.61 ppm en lluviosa, y a partir del metalimnion desciende a 0.55 ± 0.35 ppm, con diferencias despreciables entre épocas en el hipolimnion (meses secos= 0.63 ± 0.59 ppm, lluviosos= 0.55 ± 0.60 ppm). De modo que en un año hidrológico completo la concentración media de OD es prácticamente similar, exceptuando durante los meses de mezcla (diciembre a febrero) cuando el oxígeno cae a 2.73 ± 2.26 pm en el epilimnion.

Se observa un patrón similar para la temperatura en las zonas de fluctuación del hipolimnion (Fig. 6A y B) con una diferencia media entre épocas de apenas 0.13 °C en la capa 25-35 m, sin embargo en los meses de mezcla la diferencia se aproxima a 1 °C, suficiente como para ocasionar cambios importantes en la densidad del agua (Lewis, 2010).

La DE de la DQO aumenta con la profundidad y con ello su rango de concentración media. En época seca a partir de 29.13 ± 9.69 ppm en el epilimnion, se amplía a 31.34 ± 15.49 ppm en la capa a 30 m y 37.5 ± 24.11 ppm a 60 m en hipolimnion. Durante los meses lluviosos los rangos se amplían aún más pasando de 29.1 ± 18.28 ppm en el epilimnion a 37.06 ± 31.86 y 38.52 ± 39.09 ppm a 30 y 60 m. Un patrón diferente se observa en la DBO, por un lado permanece estable en el epilimnion con rangos similares entre períodos (seco: 6.04 ± 3.05 ppm, lluvioso: 6.21 ± 3.55 ppm), decreciendo con la profundidad durante los meses secos con rangos prácticamente iguales entre las capas profundas (5.15 ± 1.62 a 30 m y 5.14 ± 1.85 ppm a 60 m), pero ampliándose en los meses

lluviosos (5.67 ± 4.45 a 30 m y 6.28 ± 4.22 a 60 m).

Por otro lado, la relación DQO/DBO₅ ha incrementado en un 68% desde que en los '70s fuese reportada un inquietante valor de 3, comparable en calidad a los efluentes de plantas de tratamiento (Roldán P. & Ramírez R., 2008). Lo que sugiere que el aporte alóctono de sólidos en los meses lluviosos o bien la resuspensión de los mismos durante la inversión térmica (diciembre a febrero), estaría accionando el consumo de oxígeno ($\rho = -0.30$), y consecuentemente de un aumento del NH₄⁺ ($\rho = 0.35$) al incrementar los STD.

Macroconstituyentes

Los macro-constituyentes aniónicos mayoritarios en la columna de agua son HCO₃⁻ y CO₃²⁻, oscilando desde 63.44 a 300.74 mg.l⁻¹ los primeros y desde 2 a 51.22 mg.l⁻¹ los segundos, con promedios de 223.47 ± 44.96 mg.l⁻¹ y 22.49 ± 9.83 mg.l⁻¹, respectivamente. El catión dominante, el Na⁺, ha oscilado en un rango desde 31.44 a 87.10 mg.l⁻¹, con una media de 61.19 ± 9.83 mg.l⁻¹. Por lo tanto, el Lago es esencialmente bicarbonatado-sódico en correspondencia con los tipos hidroquímicos predominantes al oeste y suroeste del Lago (INETER, 1988), proviniendo el Na⁺ posiblemente de la disolución de las rocas (Lampert & Sommer, 2007).

Las proporciones Ca²⁺/Mg²⁺ y Ca²⁺/Na⁺, estimadas para las aguas superficiales del Lago, disminuyeron en relación a los '70s (Barlow et al., 1976) en casi un 18% la primera y en un 31% la segunda, lo que sugiere una disminución del Ca²⁺ en relación a otros cationes. Lo que sugiere que a partir de la superficie, dominada por CO₃²⁻ se daría una precipitación del carbonato de calcio (Barlow et al., 1976) hacia el fondo, en cuyo medio ligeramente más ácido se vería

favorecida su disolución, liberándose nuevamente iones Ca²⁺ presentes en el hipolimnion (Fig. 7) y soportando la producción de HCO₃⁻ ($\rho = 0.43$).

Los cloruros por otro lado se encuentran en el rango de concentración media de 10.07 ± 4.30 mg.l⁻¹ que está muy lejos de superar el límite máximo recomendado por la EPA (2017).

Alcalinidad y Dureza

La alcalinidad de Masaya varía en un rango entre 108 y 278 mg.l⁻¹ y está claramente afectada por los iones HCO₃⁻ ($\rho = 0.80$), manteniendo prácticamente el mismo rango todo el año, por lo que se comprueba una alta capacidad de bufereo en las aguas del Lago (Fig. 7). La mediana de la alcalinidad fue de ~ 224 mg.l⁻¹, muy por encima del valor mínimo del criterio de concentración continua (20 mg.l⁻¹) sugerido por la EPA como indicador de riesgo a la acidificación (2017).

Restringido a valores de aguas superficiales, existe una fuerte correlación entre la suma Ca²⁺+Mg²⁺ con la dureza total ($\rho = 0.92$, $p < 0.01$, $n = 91$), siendo determinante la concentración de Mg²⁺ ($\rho = 0.70$, $p < 0.01$, $n = 91$). La dureza total ha oscilado entre 50.96 y 172.40 mg.l⁻¹.

Fósforo y estado trófico

De acuerdo a los criterios de valor límite para categorías tróficas, basados en las concentraciones medias de FT (O'Sullivan & Reynolds, 2003) el Lago Masaya ha alternado su estatus de hipereutrófico en 1988, a eutrófico en los períodos 1989-1993 y 2003-2004, con pequeñas diferencias entre épocas. Por una parte, las concentraciones medias de los meses lluviosos de 1988 y 1989 tuvieron reducción del 16% y 48% respecto a los meses secos en los años referidos; luego en 1992 la diferencia de concentraciones entre épocas implicó cambio de estatus,

siendo eutrófico en época seca ($38 \mu\text{g.l}^{-1}$) y mesotrófico en lluviosa ($29 \mu\text{g.l}^{-1}$).

Metales

El Mn aumenta su concentración con la profundidad ($\rho=0.750$) o cuando el ORP disminuye en época lluviosa, lo que igualmente fue reportado por Singh et al. (2008) para otro lago tropical en India; sin embargo la relación negativa con el pH ($\rho = -0.632$) obtenida en este trabajo contrasta con la observada por ellos. El incremento del Mn en época lluviosa (Fig. 7) es consistente con la anoxia del fondo ($\rho = -0.632$), condición en la cual el Mn (II) suele ser significativa (Martin S. T., 2005).

A pesar de que el rango de Al en la superficie del Lago es mayor en época lluviosa ($5.89\text{--}524.7 \mu\text{g.l}^{-1}$) que en la seca ($11.58\text{--}499.14 \mu\text{g.l}^{-1}$), el valor M_e en los meses secos ($112.47 \mu\text{g.l}^{-1}$) es de hecho mayor que en los lluviosos ($62.77 \mu\text{g.l}^{-1}$), habiendo mayor dispersión en la superficie del Lago.

En las capas superiores a 1m de profundidad, el 76% de las concentraciones en época seca es igual o inferior a un valor M_e de $85.04 \mu\text{g.l}^{-1}$, sobre todo en puntos cercanos a los drenajes superficiales más importantes al SE (lagunas de estabilización de Masaya) y al S (Venecia) del Lago, estando activo en esta época fundamentalmente el primero. En los meses lluviosos sucede lo opuesto, con el 70% de las concentraciones en la columna ($>1\text{m}$ profundidad) superiores a un valor mediano de $120 \mu\text{g.l}^{-1}$. De modo que en época seca la concentración de Al es mayor

en la superficie y luego en la lluviosa aumenta en las capas más profundas, y en ambos casos supera el límite de concentración recomendado ($87 \mu\text{g.l}^{-1}$) por EPA la (2017).

Otros elementos

Aun cuando normalmente tanto F^- como B no suelen ser incluidos en estudios limnológicos, han sido medidos históricamente por el CIRA, razón por la que fueron incluidos en este trabajo.

El volcán Masaya es una fuente natural de flúor que libera $\sim 25 \text{Mg.d}^{-1}$ de HF (Martin et al., 2010), sin embargo el Lago presenta un valor mediano de F^- de 0.38mg.l^{-1} , siendo consistente con el valor esperado ($<1 \text{mg.l}^{-1}$) para las aguas naturales (Hem, 1985). El contraste parece deberse a que la zona de influencia de los gases está ubicada en una extensa área al SO del volcán (Johnson y Parnell, 1986) en dirección opuesta al Lago. Sin embargo, es interesante notar que el incremento en más de 2mg.l^{-1} de F^- disuelto coincidió con el paso del huracán Joan-Miriam en 1988, persistiendo esa concentración incluso el año siguiente.

Por su parte, el boro ha tenido una concentración media de $0.14 \pm 0.06 \text{mg.l}^{-1}$, relativamente bajo si se considera que puede ser liberado a través de los gases volcánicos como ácido ortobórico H_3BO_3 o como halogenuro BF_3 (Hem, 1985); no obstante, el inventario de gases presentado por Martin et al. (2010) no indicó presencia de boro en los gases del volcán Masaya.

Tabla 2. Correlaciones entre variables selectas del Lago Masaya.

Se presentan únicamente las variables (incluyendo *profundidad*) que obtuvieron valores del coeficiente de correlación de Spearman $\rho > 0.3$ o $\rho < -0.3$, excluyéndose por este motivo Al y ORP. Se indican las correlaciones positivas con fondo celeste (oscuro: $\rho > 0.5$, claro: $0.3 < \rho \leq 0.5$) y negativas con fondo rosado (oscuro: $\rho < -0.5$, claro: $-0.5 \leq \rho < -0.3$). sig.: significancia bilateral; en negrilla y subrayados las correlaciones altamente significativas (sig. < 0.01) y en sólo negrillas las significativas (sig. < 0.05). Los valores de combinaciones repetidas son reflejados una única vez, por ello la presencia de celdas vacías. n: número de datos correlacionados en cada par de variables. Los valores de ρ y sig. se presentan redondeados, de modo que una sig. = 0.01 puede indicar 0.011 ó 0.009, por la cual se han subrayado las correlaciones altamente significativas; o bien, una valor de $\rho = 0.50$ puede indicar 0.51 ó 0.49, por lo cual la diferencia de colores de fondo.

		STD	Alc.-T	HCO3-	K+	Na+	Cl-	NH4+	CE	Ca2+	FTD	prof.	Temp.	Mg2+	SO42-	F-	FT	pH	CO32-	Turbid.	Alc.-fen	OD	NO32-	Fe-T	DBO5	PO43-T	DQO	Mn	SiO2	NO2-	
STD	ρ	1	<u>0.85</u>	<u>0.86</u>	<u>0.39</u>	<u>0.75</u>	<u>0.47</u>	<u>0.35</u>	<u>0.63</u>	<u>0.25</u>	0.13	<u>0.33</u>	-	<u>-0.14</u>	-	-	-	-	-	-	-	-	<u>0.31</u>	-	-	-	0.05	0.05	-	0.13	<u>0.61</u>
	sig.		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00	0.04	0.01	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.01	0.00	0.82	0.29	0.62	0.62	-	0.32	0.00	
	n	307	303	300	282	294	302	92	300	304	108	307	118	303	288	213	236	306	293	213	173	67	129	123	111	100	97	0	58	53	
Alc.-T	ρ		1	<u>0.80</u>	<u>0.40</u>	<u>0.64</u>	<u>0.40</u>	0.19	<u>0.57</u>	<u>0.27</u>	0.00	<u>0.25</u>	-	<u>-0.17</u>	-	-	-	-	-	-	-	-	<u>0.24</u>	-	-	-	0.12	-	0.13	<u>0.47</u>	
	sig.			0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.97	0.00	0.49	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.43	0.00	0.03	0.70	0.01	0.32	0.51	0.15	0.24	0.34	0.00		
	n		315	311	293	305	313	92	308	315	111	315	117	314	297	217	246	314	304	224	174	67	136	123	115	106	101	0	58	54	
HCO3-	ρ			1	<u>0.11</u>	<u>0.17</u>	<u>0.17</u>	<u>0.59</u>	<u>0.55</u>	<u>0.43</u>	0.18	<u>0.49</u>	-	<u>-0.15</u>	-	-	-	-	-	-	-	-	<u>0.38</u>	<u>0.23</u>	-	0.18	0.02	0.10	<u>0.52</u>		
	sig.				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.26	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.07	0.83	0.44	0.00			
	n			432	410	422	429	91	306	432	110	432	116	431	413	214	245	312	342	224	172	67	135	122	114	104	100	0	57	53	
K+	ρ				1	<u>0.59</u>	<u>0.27</u>	-	<u>0.45</u>	0.00	0.02	0.08	<u>0.24</u>	<u>0.243</u>	<u>0.18</u>	0.11	<u>0.36</u>	<u>0.22</u>	0.03	<u>0.17</u>	0.02	0.11	<u>0.39</u>	-	0.07	0.19	0.09	0.05	0.10		
	sig.					0.00	0.00	0.87	0.00	0.93	0.84	0.10	0.02	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.54	0.01	0.85	0.39	0.00	0.41	0.46	0.05	0.36	0.71	0.57		
	n				414	412	411	92	289	414	111	414	101	413	395	213	243	295	324	204	153	67	118	123	108	106	101	0	58	38	
Na+	ρ					1	<u>0.51</u>	-	<u>0.69</u>	<u>0.25</u>	-	0.04	0.13	<u>0.243</u>	<u>0.21</u>	<u>0.35</u>	<u>0.69</u>	<u>0.14</u>	0.07	0.12	<u>0.24</u>	0.02	<u>0.42</u>	<u>0.34</u>	0.07	<u>0.31</u>	0.18	0.24	<u>0.39</u>		
	sig.						0.02	0.81	0.00	0.00	0.77	0.40	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.22	0.07	0.00	0.86	0.00	0.48	0.00	0.08	0.07	0.00			
	n				426	423	91	300	426	110	426	114	425	407	212	242	307	336	217	166	66	131	122	112	105	100	0	57	51		
Cl-	ρ						1	<u>0.37</u>	-	<u>0.10</u>	0.11	0.05	<u>0.22</u>	<u>-0.10</u>	-	-	-	-	-	-	-	<u>0.25</u>	<u>0.24</u>	0.08	0.07	0.08	-	<u>0.31</u>	<u>0.32</u>		
	sig.							0.11	0.03	0.24	0.30	0.02	0.04	0.34	0.87	0.01	0.05	0.04	0.01	0.40	0.28	0.00	0.01	0.42	0.50	0.42	0.02	0.02			
	n					433	91	308	433	109	433	115	432	416	216	246	314	343	224	175	67	138	121	115	104	101	0	58	54		
B	ρ							1	<u>0.11</u>	0.14	0.17	0.02	0.16	0.05	0.08	0.04	0.00	<u>0.25</u>	<u>0.19</u>	0.00	0.16	0.06	0.00	0.08	0.01	0.17	0.15	-	<u>0.31</u>	0.29	
	sig.								0.18	0.05	0.10	0.76	0.11	0.47	0.28	0.57	0.97	0.00	0.01	0.99	0.12	0.62	0.99	0.45	0.96	0.15	0.18	0.03	0.19		
	n								76	195	201	90	201	93	201	196	166	190	201	195	122	96	65	71	94	90	77	83	0	52	22
PO43-d	ρ								1	<u>0.32</u>	<u>0.23</u>	<u>0.69</u>	<u>0.33</u>	<u>0.47</u>	-0.16	0.04	<u>0.23</u>	<u>0.48</u>	<u>0.28</u>	<u>0.19</u>	<u>0.45</u>	-	<u>0.61</u>	-	<u>0.33</u>	<u>0.38</u>	<u>0.72</u>	0.13	-	<u>0.48</u>	
	sig.									0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.70	0.02	0.00	0.00	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28	0.00	0.00			
	n									82	103	106	99	106	106	104	104	101	106	102	30	0	66	0	106	79	65	76	0	52	0

NH4+	ρ	1	0.22	0.33	0.40	0.81	0.60	0.03	0.32	0.22	0.59	0.59	0.60	0.13	0.70	0.49	0.10	0.41	0.08	0.18			
	sig		0.00	0.00	0.00	0.00	0.81	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.73	0.00	0.00	0.37	0.01	0.51	0.18				
	n	92	89	92	80	92	73	92	89	87	84	92	86	10	0	67	0	91	81	43	78	0	56
CE	ρ	1	0.15	0.04	0.37	0.31	0.00	0.49	0.17	0.48	0.41	0.14	0.01	0.21	0.17	0.23	0.06	0.11	0.11	0.02	0.39	0.11	0.56
	sig		0.01	0.66	0.00	0.00	1.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.89	0.00	0.04	0.01	0.49	0.25	0.27	0.81	0.00	0.44	0.00
	n	407	311	108	407	199	310	292	214	242	406	300	223	173	150	135	120	112	105	98	77	55	51
Ca2+	ρ	1	0.18	0.22	0.29	-0.20	0.12	0.25	0.34	0.40	0.22	0.33	0.35	0.46	0.15	0.23	0.15	0.52	0.07	0.00	0.13		
	sig		0.06	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.01	0.10	0.00	0.46	0.98	0.33		
	n	437	111	437	118	436	417	218	248	317	346	227	176	67	139	123	115	106	101	0	58	55	
FTD	ρ	1	0.36	0.35	-0.08	0.00	0.16	0.71	0.24	0.14	0.05	0.26	0.54	0.32	0.29	0.67	0.13	0.61					
	sig		0.00	0.00	0.43	0.98	0.11	0.00	0.01	0.16	0.79	0.74	0.00	0.00	0.01	0.00	0.27	0.00					
	n	111	111	82	111	103	103	109	111	104	36	4	60	1	103	76	69	72	0	50	0		
prof.	ρ	1	0.56	0.10	0.34	0.01	0.13	0.52	0.38	0.06	0.39	0.75	0.07	0.37	0.09	0.26	0.01	0.75	0.33	0.00			
	sig		0.00	0.05	0.00	0.84	0.05	0.00	0.00	0.35	0.00	0.43	0.00	0.31	0.01	0.92	0.00	0.01	1.00				
	n	539	205	436	417	218	249	414	346	227	176	155	139	123	116	106	102	78	58	55			
Temp.	ρ	1	0.03	0.06	0.24	0.58	0.51	0.31	0.33	0.15	0.76	0.15	0.19	0.07	0.59	0.06	0.83	0.30	0.43				
	sig		0.75	0.52	0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.47	0.00	0.43	0.07	0.53	0.00	0.64	0.00	0.04	0.04				
	n	205	118	114	96	98	204	110	45	27	140	30	88	78	51	68	78	48	23				

Tabla 2. Continuación... (ver leyenda en la página anterior).

	STD	Alc.-T	HCO3-	K+	Na+	Cl-	NH4+	CE	Ca2+	FTD	prof.	Temp.	Mg2+	SO42-	F-	FT	pH	CO32-	Turbid.	Alc.-fen	OD	NO32-	Fe-T	DBO5	PO43- T	DQO	Mn	SiO2	NO2-
Dza-T	ρ												0.75	0.18	0.18	-0.01	-0.13	-0.12	0.10	-0.08	-0.32	-0.45	0.03	-0.23	-0.20	-0.03		0.03	-0.25
	sig.												0.00	0.00	0.01	0.88	0.03	0.04	0.15	0.28	0.01	0.00	0.74	0.01	0.04	0.75	0.85	0.06	
	n												315	297	217	247	315	304	226	175	66	138	122	114	105	100	0	57	55
Mg2+	ρ												1	0.10	0.06	-0.06	0.09	-0.02	0.35	-0.02	-0.04	-0.48	-0.03	-0.12	-0.35	0.03	0.02	-0.27	
	sig.												0.05	0.36	0.32	0.11	0.76	0.00	0.79	0.75	0.00	0.70	0.21	0.00	0.75	0.91	0.05		
	n												436	416	217	248	316	345	227	176	67	139	122	115	106	101	0	58	55
SO42-	ρ													1	0.30	0.58	0.03	-0.17	0.07	-0.27	0.14	-0.10	-0.32	0.14	0.13	0.22	0.14	0.28	
	sig.												0.00	0.00	0.55	0.00	0.29	0.00	0.26	0.26	0.00	0.15	0.22	0.03	0.32	0.04			
	n												417	211	232	298	328	208	164	67	135	119	110	94	97	0	55	53	
F-	ρ														1	0.41	-0.36	-0.35	-0.01	-0.51	-0.07	0.11	0.05	-0.37	0.16	-0.31	-0.15	0.06	
	sig.												0.00	0.00	0.00	0.88	0.00	0.88	0.00	0.58	0.36	0.57	0.00	0.14	0.00	0.28	0.82		
	n												218	190	218	209	129	90	66	75	117	88	89	82	0	52	18		
FT	ρ															1	-0.22	-0.35	-0.13	-0.56	-0.58	0.19	0.65	0.13	0.73	0.01	0.46	0.13	
	sig.												0.00	0.00	0.10	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.21	0.00	0.93	0.00	0.55		
	n												249	248	238	165	122	64	91	107	100	103	94	0	54	25			
pH	ρ																1	0.63	0.20	0.63	0.61	-0.22	-0.37	0.20	-0.38	0.06	-0.65	0.00	0.09
	sig.												0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.04	0.00	0.55	0.00	0.99	0.53		
	n												414	305	226	175	153	138	123	114	106	101	101	78	58	54			
CO32-	ρ																	1	-0.10	0.98	0.40	-0.32	-0.32	0.21	-0.22	0.03	-0.08	-0.25	
	sig.												0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.03	0.02	0.78	0.03	0.02	0.78	0.55	0.08		
	n												346	220	174	64	134	117	109	102	97	0	54	51					
Turbid.	ρ																		1	-0.18	-1.00	-0.08	-0.04	-0.51	-0.42	-0.44	-0.63	0.22	
	sig.												0.02	0.17	0.02	0.34	0.80	0.00	0.00	0.37	0.65	0.27	0.00	0.02	0.02	0.09	0.11		
	n												227	171	2	133	38	37	65	27	30	17	0	0	0	8	55		
Alc.-fen.	ρ																			1	-0.32		0.11	-0.58	0.15		-0.33	0.02	
	sig.												0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.57	0.00	0.57	0.00	0.56			0.02			
	n												176	0	126	0	27	30	17	0	27	30	17	0	0	0	52		
OD	ρ																				1	-0.39	0.00	-0.73	-0.10	-0.75	-0.27		
	sig.												0.00	0.98	0.00	0.45	0.00	0.45	0.00	0.98	0.00	0.45	0.00	0.45	0.00	0.08			
	n												155	0	67	30	64	70	44	0	0	70	44	0	0	0			
NO32-	ρ																					1	0.28	0.58	0.01	0.69			
	sig.												0.30	0.00	0.98	0.00	0.98	0.00	0.98	0.00	0.98	0.00	0.98	0.00	0.00				
	n												139	0	16	22	7	0	0	0	0	0	0	0	0	55			
Fe-T	ρ																					1	0.10	0.50	-0.25	0.47			
	sig.												0.39	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00				
	n												123	82	66	79	0	57	0	0	0	0	57	0	0				
DBO5	ρ																						1	0.38	0.29	0.15	-0.26		
	sig.												0.01	0.00	0.26	0.53							0.01	0.00	0.15	-0.26			
	n												116	50	101	0	56	8					116	50	101	0	56	8	

CONCLUSIONES

A partir del trabajo seminal de Barlow et al. (1976) el Lago Masaya ha presentado algunos cambios importantes entre los que cabe mencionar una reducción superior al 1% del valor promedio de Cl^- , Ca^{2+} , pH, Dza-T, NO_3^{2-} , B y PO_4^{3-} T, siendo particularmente elevadas (>35%) las reducciones de NO_3^{2-} y B, y especialmente drástica (81%) la de PO_4^{3-} T; por el contrario un aumento de HCO_3^- , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , CO_3^{2-} , F^- , SiO_2 y NO_2^- en +9%, siendo los incrementos de CO_3^{2-} , F^- , SiO_2 y NO_2^- superiores al 40% y desproporcionadamente elevados los de SiO_2 y NO_2^- , con +431% y +1823%, respectivamente, siendo visible la influencia de los NO_2^- sobre la CE.

De igual manera, se ha observado un incremento sustancial en la relación DQO/DBO₅ y una disminución del Ca^{2+} en relación a otros cationes y, a partir de las concentraciones de fósforo se ha logrado determinar que el estado trófico del lago ha estado oscilando entre eutrófico e hipereutrófico.

Finalmente, en base a la disponibilidad de datos (representatividad), a su variabilidad natural (menos dispersas) y a los resultados del PCA, los macroconstituyentes (en especial HCO_3^- , Na^+ , CO_3^{2-} y K^+), algunas variables físicas fundamentales (*temperatura*, CE y pH), nutrientes (en especial fósforo), así como la alcalinidad total, resultaron ser los parámetros que potencialmente puedan explicar mejor la físico-química del Lago Masaya, por lo cual se recomienda su uso para fines de seguimiento en estudios futuros. En términos de distribución en la columna de agua las variables más estables fueron DBO₅, B y K^+ , previamente indicado.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado en su totalidad con fondos propios del CIRA/UNAN-Managua y se ha derivado de un capítulo de la tesis de maestría *Reconstrucción cualitativa de algunos cambios limnológicos recientes (últimos 130 años) del Lago Masaya, Nicaragua*, presentada en esta misma institución en diciembre del 2015, actualizando y ampliando la información de partida. La base de datos generada como subproducto de este artículo ha sido entregada a las autoridades pertinentes del centro. Agradezco a la Dirección del CIRA por autorizar el acceso y uso académico de los datos utilizados en este trabajo y de igual forma a los docentes Roberto Cano E. y Francisco Picado, amable y desinteresadamente facilitaron sus comentarios y sugerencias para mejorar este trabajo. Entrego esta contribución como un homenaje a las decenas de técnicos, especialistas y docentes del centro que a través de su esfuerzo acumulado en campo y laboratorio han hecho posible la disponibilidad de los datos, desde hace más de tres décadas.

REFERENCIAS

- Alcaldía de Masaya & AMICTLAN. (2009). *Plan Ambiental Municipal de Masaya 2009-2029*. Agència Catalana de Cooperació al Desenvolupament (ACCD) y Geólogos del Mundo (WG), Masaya; 110p.
- BANIC. (1977). *Informe Financiero 1976*. Managua.
- Barlow, G. W., Baylis, J. R., & Roberts, D. (1976). *Chemical analysis of some crater lakes in relation to adjacent Lake Nicaragua*. En T. B. Thorston (Ed.), *Investigations of the Ichthyofauna of Nicaraguan Lakes* (p. 17-20). Lincoln: University of Nebraska.

- Brönmark, C., & Hansson, L.-A. (2005). *The biology of lakes and ponds*. Oxford University Press. 285p.
- CIRA/UNAN-Managua. (2013). *Establecimiento de Línea de Base sobre la calidad actual del agua y sedimentos de la Laguna de Masaya - año 2012*. Informe Preliminar, ENACAL, UNAN Managua, 339p.
- EPA. (2017). *National recommended water quality criteria for aquatic life*. Última actualización: Mayo 9, 2017.
- Golterman, H. L. (1975). *Stratification in deep lakes* (Chapter 9). En *Developments in Water Science*. Vol 2: Physiological Limnology. An approach to the physiology of Lake Ecosystems. 489p. Elsevier. doi:10.1016/S0167-5648(08)71066-9. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167564808710669>
- Hammer, Ø., Harper, D. A., & Ryan, P. D. (2001). PAST: *Paleontological statistics software package for education and data analysis*. *Paleontologia Electronica*, 4 (1), 9p. Recuperado el 2013, de http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm
- Hem, J. D. (1985). *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water*. USGS Water-Supply Paper 2254. University of Virginia, Charlottesville. 263 p. Recuperado de <https://pubs.usgs.gov/wsp/wsp2254/pdf/wsp2254a.pdf>
- Hooker, E. L., Chow, N., & Saavedra, R. (1992). *Phytoplankton biomass and primary productivity of Lake Masaya (Nicaragua)* (Abstract; p.897). En A. Sládecková (Ed.), *Proceedings of the International Association of Theoretical and Applied Limnology*, 25 (2). Congress in Barcelona, España.
- Incer-Barquero, J., & Gutiérrez H., C. (1975). *Plan Maestro para el Establecimiento y Manejo del área del Volcán Masaya como parque*. Universidad Centroamericana - UCA, Catastros e Inventarios de RRNN del Instituto Geográfico Nacional, Banco Central de Nicaragua, FAO/PNUD. 144p.
- INETER. (1988). *Mapa hidrogeoquímico del cuadrante Granada, N.C. 16-3*. Mapa en escala 1:250,000, 2da. Ed. (Dpto. Hidrogeología) Dir. Recursos Hídricos.
- INETER. (2001). *Datos sobre la hidrología de Nicaragua. Lagos y lagunas de Nicaragua*. Información actualizada el 01/02/2001, INETER, Dpto de Recursos Hídricos. Recuperado de <http://webserver2.ineter.gob.ni/Direcciones/Recursos%20Hidricos/dirgral/datoshidro.htm>
- INETER. (2006a). *Batimetría de la Laguna de Masaya*. Base de Datos de Oct. 2006, INETER, Dirección General de Recursos Hídricos, Dirección de Hidrografía.
- INETER. (2006b). *Datos sobre la "Laguna de Masaya"*. Información actualizada el 27/04/2005, INETER, Dirección General de Recursos Hídricos, Dirección de Hidrografía. Recuperado de <http://webserver2.ineter.gob.ni/Direcciones/Recursos%20Hidricos/HIDROGRAFIA%20WEB/Lagunas/Masaya.htm>
- INETER. (2006c). *Base cartográfica del pacífico de Nicaragua, escala 1:50,000, 3ra Edición*. (shapefiles de cuencas y subcuencas nacionales, así como hoja topográfica 2951-1).
- JICA & INAA. (1993). *Estudio sobre el Proyecto de Abastecimiento de Agua*

- en Managua*. Informe Principal. Kokusai kogyo Co., Ltd., Tokio. Recuperado de http://www.bvsde.org.ni/Web_textos/Enacal/Enacal0019/002981.pdf
- Johnson, N., & Parnell, R. A. (1986). *Composition, distribution and neutralization of "acid rain" derived from Masaya volcano, Nicaragua*. *Tellus* (38B), 106-117.
- Lampert, W., & Sommer, U. (2007). *Limnoecology*. The Ecology of Lakes and Streams (2nd ed.). Oxford University Press, 324p.
- Larson, G. (1989). *Geographical distribution, morphology and water quality of caldera lakes: a review*. *Hydrobiologia*, 171, 23-32.
- Lewis, W. M. (2010). *Biogeochemistry of tropical lakes*. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 30, parte 10, 1595–1603.
- López M., C., & Prado B., V. (2013). *Diagnóstico de la contaminación ambiental de la laguna de Masaya por residuos sólidos*. ENACAL, FCAS, AECID. VEOLIA water, TecniTasa. 78p.
- MARENA. (2010). *Caracterización de la Cuenca N°69, del Río San Juan*. MARENA, Dirección de Recursos Hídricos y Cuencas Hidrográficas, Managua, 47p.
- Martin, S. T. (2005). *Precipitation and dissolution of Iron and Manganese Oxides* (Chapter 3, p.61). En V. H. Grassian (Ed.), *Environmental Catalysis* (701p). Taylor & Francis. doi:10.1201/9781420027679.ch3
- Martin, R. S.; Sawyer, G. M.; Spampinato, L.; Salerno, G. G.; Ramirez, C.; Ilyinskaya, E.; Witt, M. L. I.; Mather, T. A.; Watson, I. M.; Phillips, J. C.; & Oppenheimer, C. (2010). *A total volatile inventory for Masaya Volcano, Nicaragua*. *Journal of Geophysical Research*, 115, B09215, 12p. doi:10.1029/2010JB007480
- McBirney, A. R. (1956). *The Nicaraguan Volcano Masaya and Its Caldera*. *Transactions American Geophysical Union*, 33 (1), 83-96.
- O'Sullivan, P. E., & Reynolds, C. S. (Edits.). (2003). *The Lakes Handbook. Vol 1: Limnology and Limnetic Ecology*. Blackwell Publishing.
- Roldán P., G. & Ramírez R., J. (2008). *Fundamentos de limnología neotropical* (2da ed.). Universidad de Antioquía. Medellín, Colombia. 440p.
- Salinas, M. (2007). *Estudios y diseño del sistema de agua potable, revisión y conclusión del diseño final del sistema de alcantarillado sanitario de la ciudad de Masaya*. ENACAL, 141p.
- Singh, A., Srivastava, P., & Srivastava, P. (2008). *Relationships of heavy metals in natural lake waters with physico-chemical characteristics of waters and different chemical fractions of metals in sediments*. *Water Air Soil Pollut*, 188, 181-193. doi:10.1007/s11270-007-9534-6
- Waid, R., Raisley, R. L., McKaye, K. R., & McCrary, J. (1999). *Zoogeografía ictiológica de las lagunas cratericas de Nicaragua*. *Encuentro* (51), 65-81.